



# Využití nanovláknenné membrány pro ochranu dřevostaveb proti vlhkosti

## Diplomová práce

*Studijní program:* N3957 – Průmyslové inženýrství  
*Studijní obor:* 3901T073 – Produktové inženýrství  
*Autor práce:* **Bc. Karolína Mayerová**  
*Vedoucí práce:* doc. Ing. Ludmila Fridrichová, Ph.D.





TECHNICAL UNIVERSITY OF LIBEREC  
Faculty of Textile Engineering



# Using Nanofiber Membranes for Protecting Wooden Buildings from Moisture

## Diploma thesis

*Study programme:* N3957 – Industrial Engineering  
*Study branch:* 3901T073 – Product Engineering  
*Author:* **Bc. Karolína Mayerová**  
*Supervisor:* doc. Ing. Ludmila Fridrichová, Ph.D.



## **ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE**

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Karolína Mayerová**  
Osobní číslo: **T14000059**  
Studijní program: **N3957 Průmyslové inženýrství**  
Studijní obor: **Produktové inženýrství**  
Název tématu: **Využití nanovlákněné membrány pro ochranu dřevostaveb  
proti vlhkosti**  
Zadávající katedra: **Katedra hodnocení textilií**

### **Z á s a d y   p r o   v y p r a c o v á n í :**

1. Proveďte rešerši na téma využití nanovlákněné membrány (NM) ve stavebnictví. Popište další materiály používané ve stavebnictví jako bariéra před průnikem vlhkosti. Zjistěte, jaké jsou možnosti a způsoby pojení stavebních vrstev. Popište principy šíření vlhkosti ve stavbách a způsoby jejího měření.
2. Změřte paropropustnost a prodyšnost u NM a stavebních materiálů, které se používají ve stavebnictví jako bariéra proti vlhkosti.
3. Připravte experiment, který bude simulovat dlouhodobé působení vlhkosti na stavbu, např. povodeň. Navrhněte přípravek a metodiku měření.
4. Navrhněte vhodnou metodiku přípravy zkušebních vzorků pro vrstvy NM se stavebním podkladem (omítkou). V experimentu vzorky vystavte dlouhodobému účinku působení vody. Potvrďte či vyvráťte hypotézu, zda lze NM použít jako bariéru proti vlhkosti.

Rozsah grafických prací:

Rozsah pracovní zprávy: 50 - 60 stran

Forma zpracování diplomové práce: tištěná/elektronická

Seznam odborné literatury:

- [1] Demo, Pavel, et al. "Nucleation on Polymer Nanofibers and their Controllable Conversion to Protective Layers: Preliminary Theoretical Study." Key Engineering Materials. Vol. 466. 2011.
- [2] Krňanský, J. "Difúzně otevřené fasády a zateplovací systémy (dýchající fasády)." TERRA 4.1 (2005): 8.


Vedoucí diplomové práce: doc. Ing. Ludmila Fridrichová, Ph.D.  
Katedra hodnocení textilií

Datum zadání diplomové práce: 27. března 2015

Termín odevzdání diplomové práce: 13. května 2016

  
Ing. Jana Drašarová, Ph.D.  
děkanka



  
doc. Ing. Vladimír Bajzík, Ph.D.  
vedoucí katedry

V Liberci dne 29. dubna 2016

## **Prohlášení**

Byla jsem seznámena s tím, že na mou diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci (TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé diplomové práce pro vnitřní potřebu TUL.

Užiji-li diplomovou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědoma povinnosti informovat o této skutečnosti TUL; v tomto případě má TUL právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Diplomovou práci jsem vypracovala samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím mé diplomové práce a konzultantem.

Současně čestně prohlašuji, že tištěná verze práce se shoduje s elektronickou verzí, vloženou do IS STAG.

Datum:

Podpis:

## **Poděkování**

Ráda bych poděkovala své vedoucí diplomové práce doc. Ing. Ludmile Fridrichové Ph.D. za odborné vedení, za pomoc a rady při zpracování této práce. Mé poděkování patří též i mé rodině za to, že mi byli oporou a umožnili mi studovat na Technické univerzitě v Liberci.

## **Anotace**

Práce se zabývá využitím membrány z nanovláknenného materiálu ve stavebnictví za účelem ochrany dřevostaveb před pronikáním vlhkosti. Membrána byla nejprve otestována zkouškou tlakem vody, která se běžně používá u textilních materiálů. Tato metoda se ukázala jako nevhodná. Z tohoto důvodu byl navržen experiment, který simuloval dlouhodobé působení vlhkosti na stavbu. Byla sledována propustnost vody u samostatné membrány i u membrány aplikované na stavební podklad. Proto byla navržena i metodika přípravy zkušebních vzorků membrány se stavebním materiálem. Připravené vzorky byly vystaveny dlouhodobému účinku působení vody. Statistické zhodnocení prokázalo signifikantní zlepšení bariérových vlastností stavebního materiálu při použití membrány. Zjištěna byla logaritmická závislost propustnosti vody na čase. Současně byla sledována paropropustnost a prodyšnost membrány, aby při aplikaci membrány nedošlo ke zhoršení difúze vodních par a proudění suchého vzduchu stěnou. Na paropropustnost a prodyšnost byly otestovány i dva další materiály, které se ve stavebnictví využívají jako bariéra proti vlhkosti. Při porovnání všech materiálů vykazovala nanovláknenná membrána statisticky významně nejvyšší hodnoty z hlediska paropropustnosti i prodyšnosti.

## **Klíčová slova**

Nanovláknenná membrána, stavebnictví, vlhkost, paropropustnost, prodyšnost, propustnost vody

## **Anotation**

This thesis deals with use of nanofiber membranes for protecting wooden buildings from moisture. The membrane was initially tested with water pressure test, which is commonly used for textile materials. This method proved to be unsuitable. Because of this we designed an experiment which simulated long-term exposure to moisture. We measured water permeability of a membrane and a membrane with building material. Therefore, we also designed preparation of test samples of the membrane with building material. The prepared samples were subjected to prolonged exposure to water. Statistical analysis showed a significant improvement in the barrier properties of the building material using the membrane. We found out that water permeability is logarithmically dependent on time. Simultaneously we monitored vapor permeability and air permeability of the membrane so that when the membrane is applied deterioration of diffusion of water vapor and dry air flow through wall does not get worse. We also tested water vapor permeability and air permeability of two other materials which are used in the construction industry as a moisture barrier. When we compared all of the exhibited materials, the nanofiber membrane showed significantly high values in terms of vapour permeability and air permeability.

## **Key words**

Nanofiber membrane, building, moisture, vapor permeability, air permeability, water permeability



# Obsah

Seznam symbolů a zkratk .....	10
Úvod .....	11
TEORETICKÁ ČÁST .....	13
1. Nanotextilie ve stavebnictví .....	13
1.1 Nanotextilie .....	14
1.2 Technologie výroby nanotextilií – elektrostatické zvlákňování.....	15
1.3 Aplikační možnosti nanovláken .....	19
1.4 Povrchové úpravy dřevěných konstrukcí .....	22
1.5 Využití nanotextilií při restaurování omítek.....	24
2. Používané materiály ve stavebnictví .....	26
2.1 Bariérové materiály na obalových konstrukcích .....	26
2.2 Hydroizolační materiály .....	26
2.3 Konstrukce dřevostaveb .....	27
2.4 Pojení stavebních vrstev .....	29
3. Vlhkostní funkce stavebních materiálů .....	31
3.1 Šíření vlhkosti .....	31
3.2 Vlhkostí problémy staveb .....	32
3.3 Metody stanovení tepelně-vlhkostí funkce .....	32
EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST .....	35
4. Charakteristika testovaných materiálů .....	35
4.1 Nanovláknenná membrána.....	35
4.2 Pojistné hydroizolace.....	37
5. Metodika .....	38
5.1 Paropropustnost.....	38
5.2 Prodyšnost .....	39
5.3 Hydrostatická odolnost.....	40
5.4 Experimentální simulace dlouhodobého působení vody.....	41
5.4.1 Zatížení hydrostatickým tlakem.....	41
5.4.2 Princip zkoušky .....	42
5.4.3 Návrhy experimentu .....	43
5.4.4 Navržená metodika měření .....	46
5.4.5 Návrh přípravy vzorků se stavebním podkladem .....	48
5.5 Statistické zhodnocení výsledků.....	51

6. Výsledky a diskuze.....	53
6.1 Paropropustnost.....	53
6.2 Prodyšnost .....	56
6.3 Hydrostatická odolnost.....	58
6.4 Propustnost vody.....	59
6.5 Předmět dalšího výzkumu.....	66
Závěr .....	68
Literatura.....	70
Seznam obrázků.....	73
Seznam tabulek .....	74

## Seznam symbolů a zkratek

$p$ [%]	- relativní paropropustnost
$q_0$ [W.m <sup>-2</sup> ]	- plošná hustota tepelného toku procházející měřenou hlavicí nezakrytou měřeným vzorkem
$q_v$ [W.m <sup>-2</sup> ]	- plošná hustota tepelného toku procházející měřenou hlavicí zakrytou měřeným vzorkem
$R_{et}$ [Pa.m <sup>2</sup> .W <sup>-1</sup> ]	- výparný odpor
$F_g$ [N]	- tíhová síla
$G$ [N]	- tíha
$g$ [m.s <sup>-2</sup> ]	- tíhové zrychlení
$m$ [kg]	- hmotnost
$p_h$ [Pa]	- hydrostatický tlak
$\rho$ [kg.m <sup>-3</sup> ]	- hustota
$V$ [m <sup>3</sup> ]	- objem
$S$ [m <sup>2</sup> ]	- plocha
$h$ [m]	- výška vodního sloupce
$t$ [d]	- čas
$d$ [cm]	- průměr kruhu
$\Delta m$ [g]	- změna hmotnosti (hmotnostní přírůstek)
$m_1$ [g]	- hmotnost sestavy, resp. sorbentu po vystavením hydrostatickému tlaku
$m_2$ [g]	- hmotnost sestavy, resp. sorbentu před vystavením hydrostatickému tlaku

## Úvod

Většinu dřevostaveb tvoří dřevěná rámová konstrukce, z čehož vzniká obava z biologické degradace dřeva v důsledku nadměrného hromadění vlhkosti. Z tohoto důvodu je snahou zabránit vlhkosti, aby vnikala do konstrukce. Zdrojem takové vlhkosti může být například vztlínání z vlhkého podloží stavby, meteorologická vlhkost způsobená deštěm či sněhem, zkondenzovaná vlhkost ze vzduchu či v extrémním případě zasažení stavby přírodními katastrofami jako jsou povodně a záplavy. Současná řešení jako například vložení polyethylenové fólie jako parozábrany však vytvářejí neprodyšný interiér, a tak paradoxně dochází k poškození stavebních vrstev vlivem vodní páry, která se snaží dostat ven. Negativním důsledkem je tak degradace materiálů, vznik plísní či zdravotní problémy obyvatelů domů. Z tohoto důvodu je potřeba vytvářet takové konstrukce, které chrání před průnikem vlhkosti zvenčí a zároveň, které nebrání difúzi vodních par z interiéru. Takové konstrukce mají pozitivní vliv na kvalitu vnitřního mikroklimatu ze zdravotního hlediska a umožňují stavbám dýchat.

Vzhledem k uvedenému výčtu vlhkostních problémů bylo cílem této diplomové práce navrhnout ochranu povrchu dřevostaveb proti pronikání vlhkosti do konstrukce. Konkrétně jsem se zaměřila na ochranu pomocí membrány z nanovláknenného materiálu. Jelikož je v problematice ochrany staveb před vlhkostí třeba brát v úvahu i to, aby ochrana povrchu nebránila difúzi vodních par z interiéru budovy, zvolila jsem právě tento nanovláknenný materiál, u kterého jsem předpokládala velmi dobrou paropropustnost. Z tohoto důvodu jsem nejprve experimentálně ověřila paropropustnost a prodyšnost membrány, aby při aplikaci membrány na stěnu nedošlo ke zhoršení difúze vodních par a proudění suchého vzduchu. Na paropropustnost a prodyšnost jsem otestovala i dva další materiály, které se ve stavebnictví jako bariéra proti vlhkosti využívají. Charakteristika testovaných materiálů je uvedena ve čtvrté kapitole.

Jelikož je označení dřevostavba širší pojem, vymezila jsem si sledovanou oblast a v práci se zabývala především tzv. sendvičovými konstrukcemi, na jejichž fasádu se používá kontaktní zateplovací systém s omítkou jako u zděných staveb. Po navržení aplikace nanovláknenné membrány na vnější stěny dřevostavby, bylo potřeba zjistit, zda došlo ke zlepšení bariérových vlastností fasády proti pronikání vody. Bylo nutné experimentálně prověřit chování textilního materiálu (nanovláknenné membrány) v kombinaci s materiálem stavebním. Samostatná membrána byla nejprve otestována zkouškou tlakem vody, která se běžně používá u textilních materiálů. Tato metoda se však ukázala jako nevhodná. V průběhu řešení práce byl proto stanoven další cíl, a to

navržení vhodné metodiky měření průniku vlhkosti. Sledováno bylo dlouhodobé působení vlhkosti na stavbu jako například při povodních. Z tohoto důvodu jsme navrhla experiment, který simuloval dlouhodobé působení vlhkosti na stavbu. Byla sledována propustnost vody u samostatné membrány i u membrány aplikované na stavební podklad. Proto jsem vytvořila i návrh metodiky přípravy zkušebních vzorků membrány se stavebním materiálem. Připravené vzorky byly následně vystaveny dlouhodobému účinku působení vody. Metodika experimentu včetně přípravy vzorků je popsána v kapitole 5.4. Otázkou bylo, zda navržené propojení se stavebním podkladem narušuje hydroizolační schopnosti testované membrány či nikoliv. Byla sledována hypotéza, zda lze tento materiál jako bariéru proti vlhkosti použít.

# TEORETICKÁ ČÁST

## 1. Nanotextilie ve stavebnictví

V současnosti je přívlastek nano téměř synonymem pokroku, a tak jsou nanotechnologie předmětem intenzivního výzkumu. Stejně intenzivně se hledají i jejich aplikace v tradičních průmyslových odvětvích. Díky nanotechnologiím je možné vyrábět mimo jiné i nanomateriály, jejichž charakteristickým rysem je, že určitý rozměr jejich struktury je neobyčejně malý, řádově v oblasti nanometrů. Nanotextilie se stávají nadějným materiálem pro možnou aplikaci i ve stavebním průmyslu a zdají se být ve značné míře využitelné i v oblasti stavebních konstrukcí. [1]

Nanovláknina patří v současné době k jednomu z nejperspektivnějších materiálů s širokými možnostmi aplikace. Jedná se o vláknité tenkovrstvé struktury, ve kterých se průměr jednotlivých vláken pohybuje v desítkách až stovkách nanometrů. Široké uplatnění nacházejí například v oblasti filtrací vzduchu, kapalin atd., kde se využívá schopnosti nanotextilií zachytit až submikroskopické částice. Jedná se například o tzv. HEPA filtry (high efficiency particulate air), které jsou schopny ze vzduchu odstranit částice o velikosti 0,3  $\mu\text{m}$  s minimálně 99,97% účinností a větší částice jsou filtrovány s ještě účinněji. Existují i tzv. UHE filtry (ultra high efficiency filter) schopné odfiltrovat částice do 0,1  $\mu\text{m}$ . Aplikace nanotextilií je rovněž vhodná při řešení absorpce zvuku. Tyto materiály se vyznačují schopností absorbovat ve zvýšené míře hlavně zvuky o nízkých frekvencích při porovnání s ostatními materiály. [1, 2]

Z výše uvedených příkladů vyplývá, že pro nanotextilie lze najít velké množství potenciálních aplikací. Proto se jeví jako perspektivní vývoj pro účely stavebnictví. Navíc díky technologii Nanospider se otevírá možnost vyrábět nanotextilie v dostatečně velkém objemu, aby začalo být zajímavé o nich uvažovat jako o stavebním materiálu. V případě nalezení vhodné aplikace pro účely velkého stavebnictví by se spotřeba materiálů neudávala v metrech, ale v kilometrech čtverečních. Z tohoto důvodu je uplatnění nanotextilií ve stavebnictví ekonomicky zajímavé i pro jejich výrobce. Argumentem, proč by se velké stavebnictví mělo orientovat na aplikaci nanotextilních materiálů jsou například následující důvody: nanotextilie nabízejí možnost regulace bariérových vlastností a existují určité aplikace, pro které lze jen těžko hledat srovnatelná alternativní řešení. V určitých směrech totiž materiály na bázi nanotextilií vykazují vynikající poměry výkon / hmotnost a výkon / cena. Využití jejich bariérových vlastností bylo již prokázáno, avšak možná aplikace je spíše otázkou ekonomickou, která souvisí s výší investic do nové technologie a zavedením nového výrobku na trh. Další možnou aplikací je především ochrana

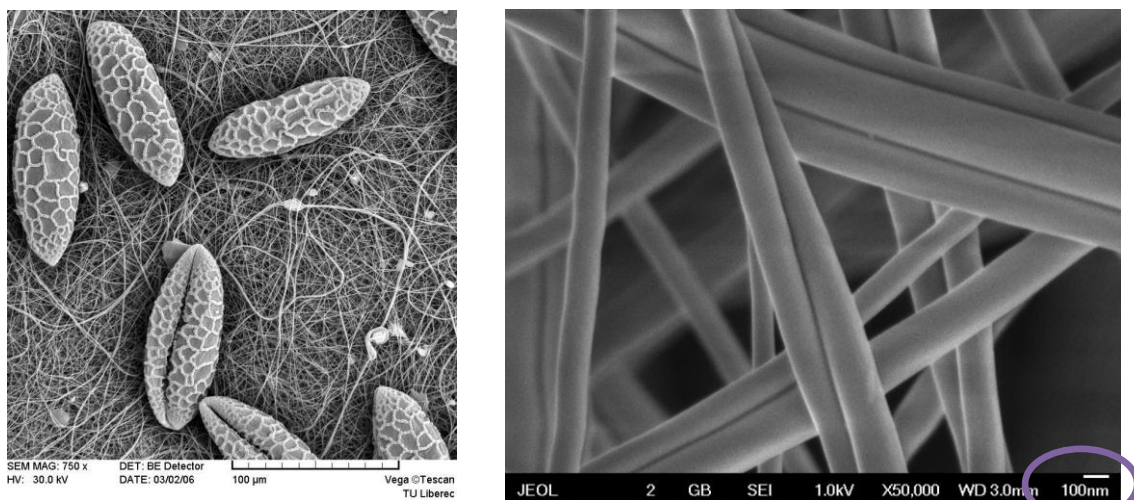
povrchů. A právě na toto téma jsou v současnosti zaměřeny výzkumy, které doplňují další experimentální poznatky a zkušenosti. [2, 3]

Při použití nanotextilií na bázi polymerů ve stavebnictví je však třeba brát v potaz i dvě principiální omezení. Nevýhodou je malá odolnost vůči teple, tudíž téměř nulová odolnost proti požáru. Dále tyto textilie vykazují nízkou UV stabilitu, což by mohlo být pro určité aplikace nedostatečné. [2]

Nanotextilie jsou materiály se specifickými vlastnostmi a extrémně vysokými „výkony“ vzhledem k malé spotřebě materiálu. Plošná hmotnost nanotextilií na bázi polymerů se totiž pohybuje v jednotkách až desítkách gramů na metr čtvereční. Proto se očekává, že se nanotextilie mohou prosadit jako stavební materiál a to nejen díky svým specifickým technickým vlastnostem, ale díky tomu, že je lze v dnešní době vyrábět relativně levně a rychle. [1, 4]

## 1.1 Nanotextilie

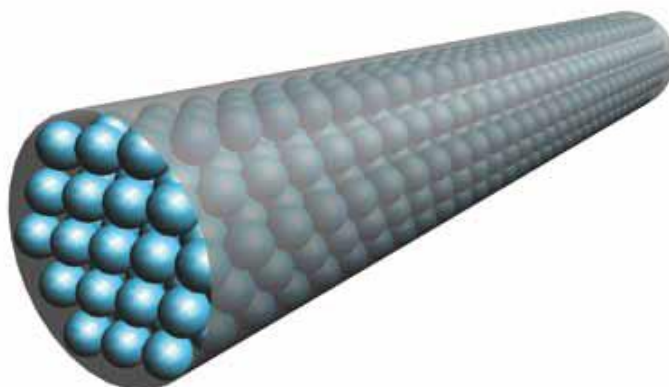
Obecně je nanotextilie označována jako netkaná textilie, která vzniká pokládkou ultrajemných vláken na rovinnou podložku. Vlákná jsou obecně definována jako délkové útvary, pro které platí, že jeden rozměr významně převyšuje zbylé dva. V případě nanovláken jde o vlákna, jejichž průměr se pohybuje v desítkách až stovkách nanometrů, přičemž horní hranice je přibližně 1000nm, což je 1 $\mu$ m. Jejich délka je tak mnohem větší než jejich průměr. Tato vlákna jsou proto též nazývána jako submikronová. V současné době je možné vyrobit pouze vláknennou vrstvu či útvar, nikoli jednotlivá vlákna. Ve vrstvě jsou vlákna kladena chaoticky bez žádné převládající směrové orientace, nejsou usměrněna. Mikroskopické snímky nanovláken jsou zobrazeny na následujícím obrázku 1. [2, 5, 6]



Obrázek 1 Mikroskopické snímky nanovláken (v prvním případě pro porovnání s pylem) [6]

Tato vlákna mohou být vyrobena s použitím různých technologií. Jednou z metod, jak lze v současnosti vyrobit nanovláknennou vrstvu je elektrostatické zvlákňování (electrospinning). Takto vyrobená vlákna mají řadu výjimečných vlastností. Jedná se hlavně o již zmíněný malý průměr vláken (50 – 1000nm) a z toho vyplývající velký měrný povrch. Vzhledem ke své jemnosti mají malou velikost pórů, ale vysokou pórovitost. Zároveň mají v poměru ke své hmotnosti velmi dobré mechanické vlastnosti. Polymerní nanovlákna mají totiž vysoce orientovanou krystalickou strukturu, která zajišťuje vysokou výslednou pevnost. [2, 3, 5, 6]

Na rozdíl od makroskopických vláken jako je například skelná vata má systém nanovláken mnohem větší plochu. Poměr plochy k objemu vlákna je mnohem větší než jedna, a tak plochu lze využít pro přestup tepla či na absorpci vhodných částic. Této vlastnosti využívá také katalytická chemie, protože čím větší má objekt povrch, tím bude probíhat více chemických reakcí. Plocha vláken tak umožňuje mnohem intenzivnější fyzikálně-chemický kontakt s okolím. Jelikož se průměry nanovláken pohybují v řádu desítek až stovek nanometrů, v průřezu vlákna se nachází velice málo atomů nebo molekul. Takové objekty se vyznačují minimem strukturálních poruch jako například dislokace krystalové mřížky. Malý počet atomů v průřezu vlákna totiž nenechává příliš prostoru pro vznik defektů. Schematické znázornění atomů v nanovlákně je zobrazeno na obrázku 2. Tím pádem mají nanovlákna mnohem atraktivnější mechanické vlastnosti – jsou pružnější a mají poměrně vysokou pevnost. [7, 8]



Obrázek 2 Schematické znázornění atomů v nanovlákně [7]

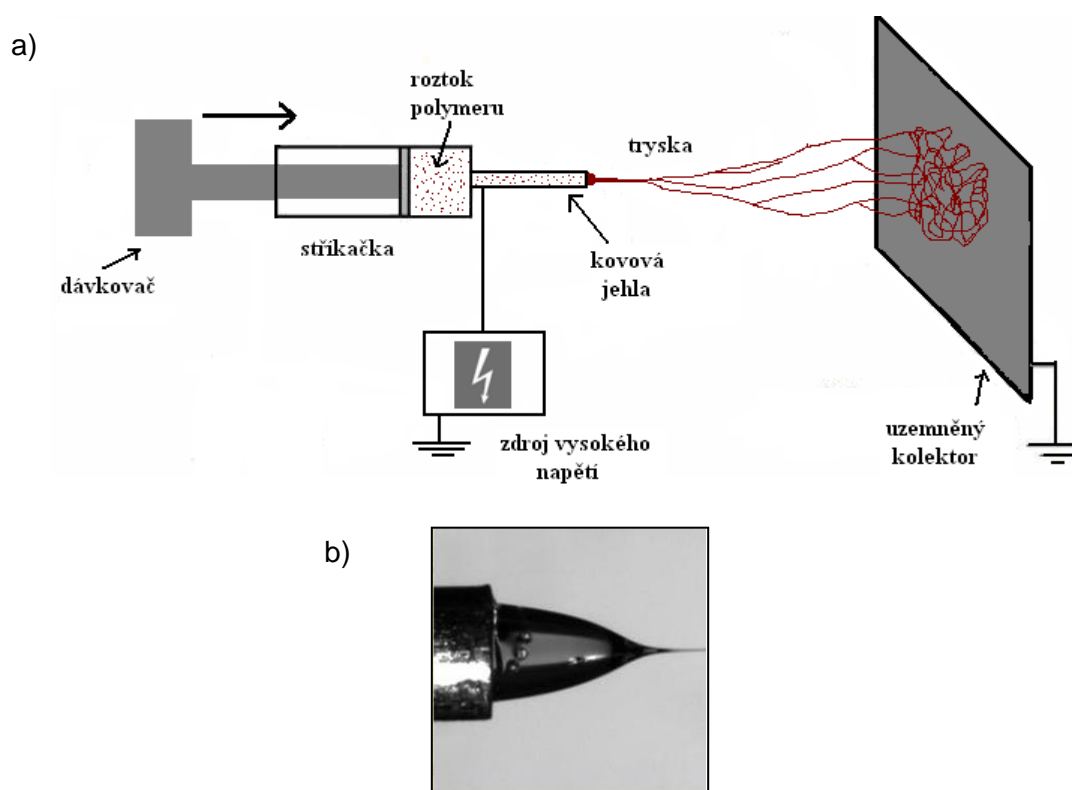
## 1.2 Technologie výroby nanotextilií – elektrostatické zvlákňování

Elektrostatické zvlákňování (electrospinning) je principiálně jednoduchá metoda výroby nanotextilií. Zvlákňovaným materiálem je roztavený polymer (tavenina) nebo jeho roztok. Například polyamid 6 se zvlákňuje z roztoku. V technologii elektrostatického zvlákňování je využito stejnosměrného zdroje vysokého napětí.



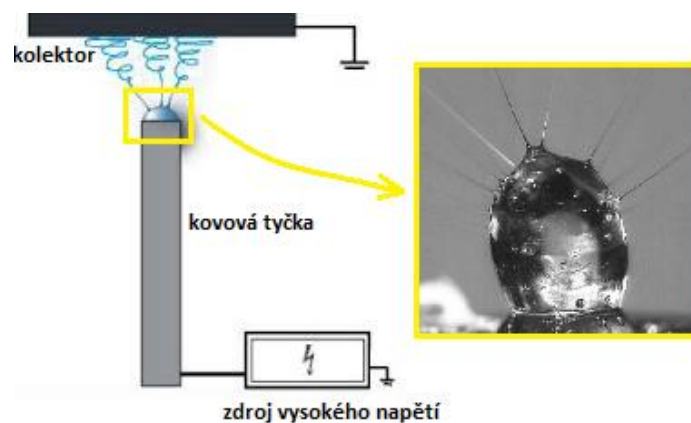
Dochází tak k vytvoření elektricky nabitého proudu polymerního roztoku nebo taveniny. Zvlákňování je možné provádět z jehly (trysky) nebo lze použít bezjehlové zvlákňování.

V případě jehlového zvlákňování, které je schematicky znázorněno na obrázku 3, je polymer vháněn do kovové jehly ve tvaru kapiláry. Ke zvlákňování zde dochází ústím této jehly. Elektroda vysokého napětí je přímo spojena s polymerem, polymer je tak kontaktně vystaven vysokému napětí. Elektrické pole mezi ústím kapiláry a uzemněným kolektorem vytahuje proud polymeru do prostoru, dluží jej, štěpí a ukládá na kolektor. Díky vysokému napětí v prostoru mezi kapilárou a kolektorem dochází ve špičce kapiláry k tvorbě tzv. Taylorova kužele, který produkuje submikronová vlákna. [2, 5, 6, 9]



Obrázek 3 a) Schéma elektrostatické zvlákňování z trysky; b) Taylorův kužel [6]

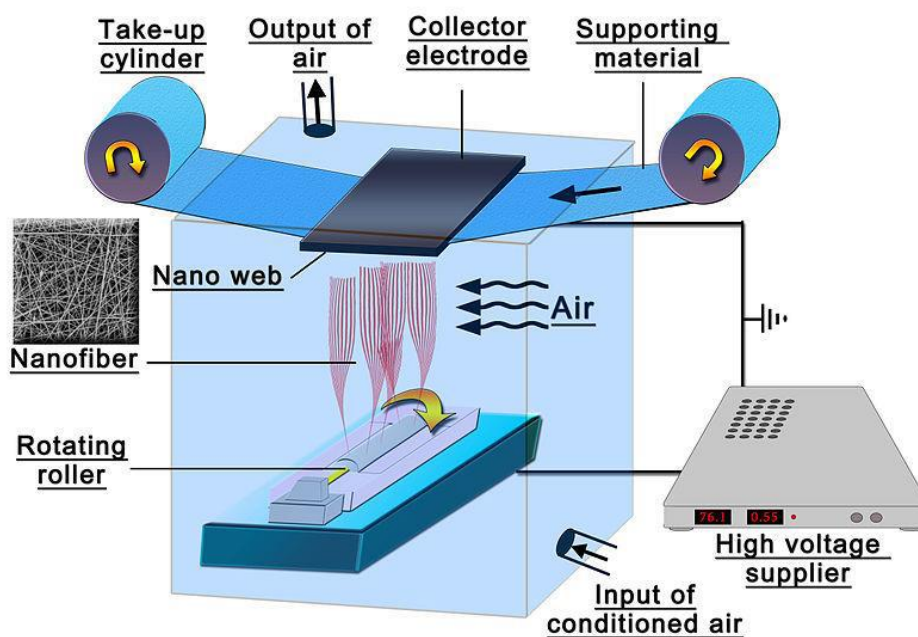
Druhou možností je zvlákňování bez trysky, označované jako bezjehlové. Jedná se o tzv. zvlákňování z volného povrchu. Příkladem této technologie je zvlákňování z tyčky, které je na obrázku 4. V tomto případě je malé množství polymerního roztoku nebo taveniny na vrcholu kovové tyčky, která připojena na zdroj vysokého elektrického napětí. Obdobně jako u jehlového zvlákňování dochází díky elektrickému poli mezi povrchem kovové tyčky a uzemněným kolektorem k vytažení proudu polymeru z kapky do prostoru a zachycení vláken na kolektor.



Obrázek 4 Zvlákňování z tyčky [6]

### ***Technologie Nanospider***

Nanospider je jedna z metod elektrostatického zvlákňování polymeru. Ač je několik možností, jak produkce nanovláken, Nanospider je technologie schopná vyrábět nanotextilie v opravdu masovém (a pro potřeby stavebnictví zajímavém) měřítku. Tato technologie je navíc schopna garantovat stabilitu vlastností a homogenitu vyrobeného produktu. [7]



Obrázek 5 Princip zařízení Nanospider [6]

Technologie Nanospider byla vynalezena v roce 2003 kolektivem profesora Oldřicha Jirsáka na Katedře netkaných textilií TU v Liberci. Díky ní je možné vyrábět nanotextilie s průměry vláken v rozmezí 100 – 500nm. Princip je založen na poznatku, že Taylorovy kužele (obrázek 3 b) je možné vytvořit na celé tenké vrstvě polymerního roztoku nebo taveniny. Elektroda je v tomto případě rotující válec, který je z části ponořen v polymeru, a nachází se pod elektrickým napětím. Je zde absence trysek a jedná se tedy o bezjehlové zvlákňování. Po celé ploše válečku se tvoří velké množství Taylorových kuželů, a tak jsou nanovlákná pod vlivem elektrického pole natahována nahoru a ukládána na podkladový materiál, který je veden po uzemněném kolektoru. Ten je zároveň druhou elektrodou a je umístěn nad válcem. Princip zařízení je názorně vysvětlen na obrázku 5. [2, 5, 6, 9]

Vláknenná vrstva vyrobená touto technologií je však příliš subtilní a má pro potřeby stavebnictví nedostatečné mechanické vlastnosti. Proto je během technologického procesu nanášena na nosnou, obvykle netkanou, textilií. Nosná textilie plní funkci nosiče nanotextilní vrstvy a dodává tak celému dvouvrstvému kompozitu potřebné mechanické vlastnosti důležité například při manipulaci. [1]

Jelikož princip výroby nanovláken je založen na dostatečně vysokém napětí do polymeru (polymer se stává elektricky nabitým), jejich průměr je možné regulovat složitou souhrou elektrostatického pole a vlastností polymerního roztoku či taveniny. K tvorbě vláken dochází díky poměru mezi povrchovým napětím a elektrickou silou polymeru, a pokud je jeho soudržnost dostatečně vysoká, proud polymeru může být vytažen do prostoru. Tloušťka nanovláknenné vrstvy závisí na rychlosti odvíjení nosné textilie, která je pomalu tažena na dvou válcích. Samotná tloušťka přímo souvisí s velikostí pórů nově vytvořené sítě nanovláken. To znamená, že čím je tlustší nanovláknenná vrstva, tím bude menší objemová poróznost mezi vlákny. Tato vlastnost již úzce souvisí s aplikačními možnostmi – ochranná vrstva tvořená nanovláknem, propustí pouze částice, jejichž charakteristický rozměr je menší než velikost pórů. Takovými částicemi mohou být například bakterie, řasy, plísně či houby. Nanovláknenná vrstva se tak stává molekulovým filtrem s říditelnými vlastnostmi, a jehož účinnost je nastavitelná při jeho vlastní produkci. [3, 7, 8]

Uvedený technologický princip umožňuje kontinuitu výroby a produkci 1-5 g.min<sup>-1</sup>.m<sup>-1</sup> pracovní šíře. Hlavní výhodou přístroje Nanospider je tedy jeho výkon. Komerčně vyrobená zařízení jsou realizována libereckou společností Elmarco, která má s TUL těsnou spolupráci a dodává na trh zařízení pro laboratorní i průmyslovou výrobu nanotextilních materiálů. [5, 6]

Popsaná technologie je schopná produkovat nanotextilie ve výši odpovídající rozsahu stavebnictví a zároveň zaručuje dostatečnou stabilitu technických

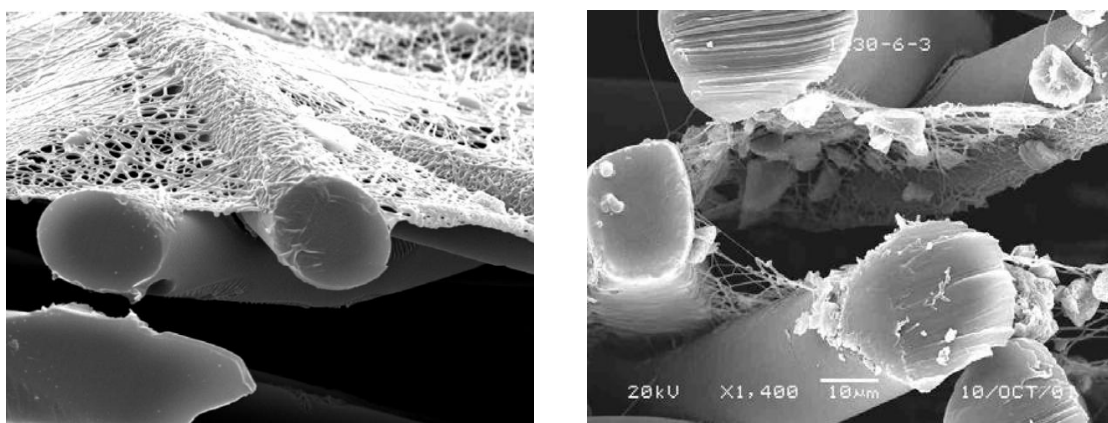
charakteristik vyrobených nanotextilií. Uvedená fakta poukazují na perspektivu výzkumů vhodných aplikací nanomateriálů ve stavebnictví. [3]

### 1.3 Aplikační možnosti nanovláken

V zásadě existují dva komplementární způsoby použití nanovláknenných textilií – pasivní a aktivní.

#### **Filtrace**

První způsob je založen na pasivní aplikaci nanovláken. Jedná se o laditelné molekulové filtry (princip síta). Vhodnou volbou průměru vlákna (do určité míry ovlivňuje velikost póru mezi vlákny) a tloušťky vláknenné vrstvy je možné v širokých mezích řídit bariérové vlastnosti. Lze zde tloušťku nanovláknenné vrstvy nanesené na nosné textilii škálovat a řídit tak vlastnosti nově vytvořené vláknenné sítě. Vyrobená nanotextilie tak může být neproniknutelná pro částice odpovídající velikosti. Obrázek 6 znázorňuje tenkou nanovláknennou vrstvu nanesenou na nosné textilii spunbond před filtrací a po filtraci se zachycenými částicemi prachu. [2, 7]

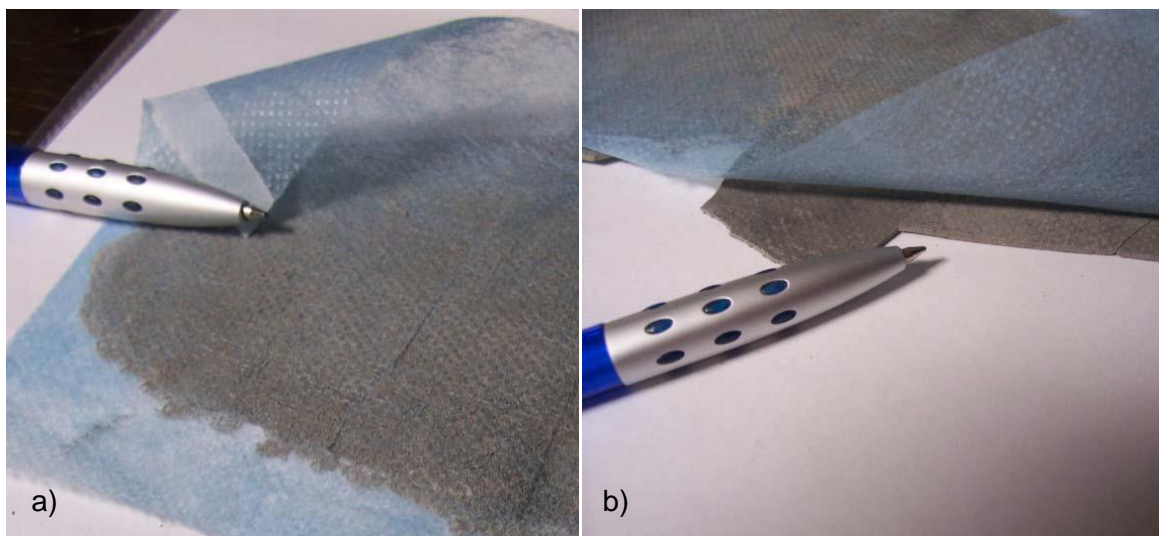


Obrázek 6 Nanotextilie před (vlevo) a po filtraci (vpravo) [2]

V oblasti ultrajemné filtrace je známa celá řada aplikací. V oblasti filtrace vzduchu se jedná například o klimatizace operačních sálů, filtry strojů aj., možná je i filtrace kapalin (voda, oleje apod.) Kromě výhodné filtrace částic submikroskopických rozměrů, jsou zde i další přednosti. Především jde o snadné čištění povrchu nanotextilního filtru proudem vzduchu a možnost zabudování antibakteriálních látek do vlákna. Proto lze očekávat rozšíření takových materiálů do klimatizačních soustav budov či jako materiály pro jemnou filtraci částic. [2]

### **Aktivní ochrana povrchů**

Filtrace však nejsou jedinou možností aplikace nanovláken. Mikrovrstvy tvořené nanovláknem lze dále transformovat. Pomocí plazmatických technologií lze například přetvořit na hydrofilní vrstvu (tzn. přitahující vodu), resp. naopak hydrofobní vrstvu (odpužující vodu). Taková nanovláknenná vrstva by mohla zjednodušit ošetřování a zrání povrchu ploch čerstvého betonu, které se musí ošetřovat kropením. Takové plochy by se pokryly nanovláknennou vrstvou, kde spodní vrstva by byla hydrofobní a nedovolovala tak proniknout vodě ven, a vrchní část by byla hydrofilní a umožňovala tak průnik atmosférických vodních par dovnitř. Výsledným efektem by byla bariéra proti vypařování vody z povrchu čerstvého betonu, a tudíž by to vedlo k minimalizaci počtu mikrotrhlin. Efekt zpomaleného odpařování potvrzují laboratorní experimenty Krňanského [2]. Nanovláknenná vrstva je obvykle nanесena na nosné textilii, a tak by bylo možné při ochraně čerstvých povrchů aplikovat dvouvrstvý systém nanotextilie-nosná textilie (nanotextilii na daný povrch). Následným nanесením zvlhčené textilie na čerstvý povrch se vrstva zafixuje (obrázek 7 a). Což je možné připodobnit k sádrovému obvazu. Po ztvdnutí materiálu je možné nosnou textilií odstranit, protože nanotextilie zůstane integrovaná v hydratovaném materiálu – zůstane součástí struktury (obrázek 7 b). Využití lze předpokládat pro čerstvé povrchy z betonové směsi, malty a omítky. [2, 3, 7]



Obrázek 7 a) Zkouška propojení pojivových složek hydratujícího materiálu textilií; b) Možné odstranění nosné textilie [2]

Nanotextilie by bylo rovněž možné aplikovat jako aktivní nosič antikoročních chemických prostředků. Již před procesem zvláknování lze do roztoku polymeru přidat

aktivní chemickou substancí a zvláknit tento systém najednou. Takový materiál by mohl po nanesení na kovové plochy stavebních prvků výrazně prodloužit jejich životnost. Při zvláknění lze do struktury vlákna začlenit i aktivní baktericid jako například stříbro, nebo dokonce nanodiamantový prášek. Lze tak získat vrstvu polymerních nanovláken obsahujících v sobě (i na svém povrchu) částice stříbra, které je silně baktericidní. Takový systém by mohl přispět k řešení problému vnitřního zateplení historických budov, u kterých zateplení zvenjšku není z pochopitelných důvodů možné. Aktuálně využívané technologie vnitřního zateplení zatím stále vedou ke vzniku plísní, bakterií a hub na vnitřních omítkách budov. Aplikace tenké vrstvy baktericidních nanovláken by vedla k minimalizaci těchto degradabilních účinků. Ošetřování povrchů je velmi aktuální téma nejen u historických omítek, ale obecně u všech budov, mostů, silnic apod., které jsou ohrožovány rostoucím množstvím agresivních látek znečišťujících ovzduší, vodu a podzemní vody. Tyto chemické a biologické látky trvale a účinně působí na použitý stavební materiál a to hlavně na jeho povrchu. Tyto problémy se dostávají do středu zájmu vzhledem k čím dál tím vyšším nákladům na údržbu a opravy stavebních objektů. Vedle čistě ekonomických důvodů zde hrají důležitou roli i bezpečnostní aspekty – některé konstrukce mohou začít ohrožovat své okolí z důvodu degradace materiálu a korozních procesů v něm. V současné době používané metody ochrany povrchů budov, mostů, silnic atd. nejsou z dlouhodobého hlediska příliš účinné. Používány jsou ochrany na chemické bázi a jsou aplikovány tradičně natíráním nebo nástřikem. Neefektivita spočívá v častém oddělení ochranného povrchu, s tím spojenou ztrátou ochranných vlastností, a v nerovnoměrnosti aplikované vrstvy. Proto se výzkum zaměřuje na vývoj nových možností ochrany povrchů pomocí nanovláken.

[3, 7, 8]

Na obrázku 8 je ukázka interiéru budovy poničené plísní a polymerní nanovláknem s nanočásticemi stříbra, které by takový povrch před plísní mohly uchránit.



Obrázek 8 a) Ukázka budovy poničené plísní; b) Nanovláknem s nanočásticemi stříbra [7]

## 1.4 Povrchové úpravy dřevěných konstrukcí

Dřevěné konstrukce v exteriéru jsou využívány nejen v moderní dřevěné architektuře, ale i u zděných a historických staveb jako pohledový materiál. Dřevo je však materiál s relativně vysokou propustností pro vodní páry. Je to hygroskopický materiál, a tudíž má snahu přizpůsobovat svou vlhkost podmínkám prostředí, v němž se nachází, tj. v závislosti na teplotě a vlhkosti okolního vzduchu. Ve vlhkém prostředí dřevěná konstrukce přijímá vlhkost ze svého okolí, a naopak v sušším prostředí vypařuje ve vzduchu vázanou vodu, až do chvíle, kdy se vyrovná tlak vodní páry ve dřevě a v okolním vzduchu. Dřevo v tomto okamžiku dosáhne tzv. rovnovážné vlhkosti. Při přijímání vlhkosti buňky ve dřevě pohlcují vodu, zvětšují svůj objem, a tím dochází k bobtnání dřeva. Absorbování vlhkosti je třeba zabránit kvůli minimalizaci vzniku nežádoucích poruch, kde vlhkostní problémy mohou způsobovat degradaci materiálu z důvodu vzniku plísní, hub a dřevokazného hmyzu.

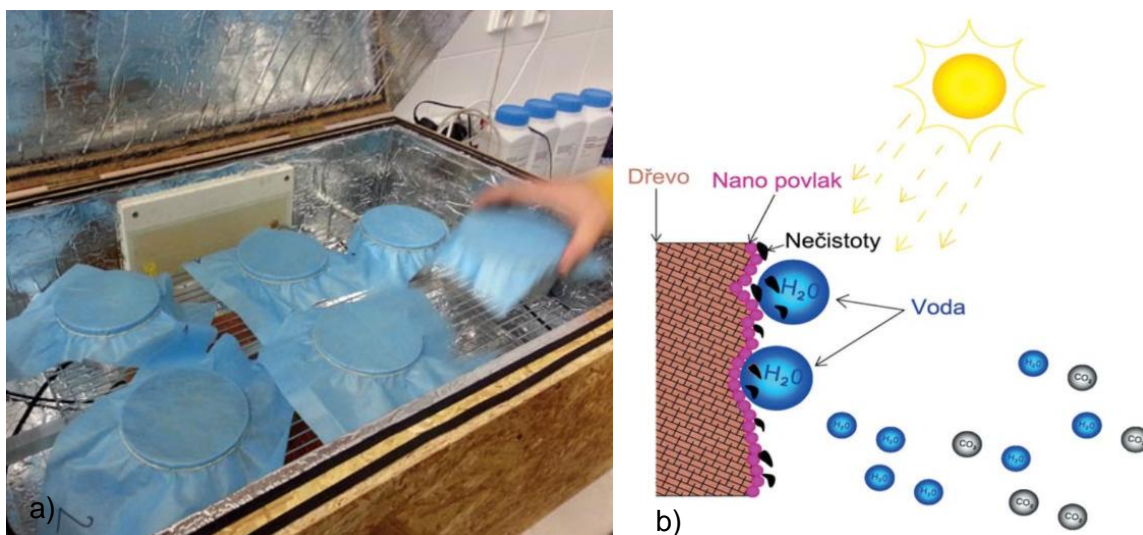
V současné době jsou dřevěné konstrukce využívány stále častěji, a to pro nosné stavební konstrukce i pro konstrukce povrchové a kompletační. Na jejich životnost a funkčnost má značný vliv mimo jiné i teplota a vlhkost okolního vzduchu. Především exteriérové podmínky snižují životnost dřevěných konstrukcí, a proto je nutné tyto jejich části chránit. Jako ochranné prostředky se v současné době využívají impregnace a různé ochranné nátěry (lazury, oleje apod.) nejčastěji na chemické bázi. V principu dochází k nasycování svého materiálu ochranným prostředkem. Ochranná povrchová vrstva chrání dřevěné konstrukce, zabraňuje difuzi vodních par dovnitř, a tak prodlužuje její životnost. Tato ochrana však ve velké míře zabraňuje i prostupu par z vnitřní strany do vnějšího prostředí, proto často dochází k poškození povrchových vrstev vlivem vodní páry, která se snaží dostat ven ze samotné konstrukce. Negativním důsledkem pak bývá různé popraskání povrchu, vyboulení a následné poruchy i samotného dřeva vlivem sesychání a bobtnání.

K difúzi vodních par totiž nedochází jen ze srážkových vod, ale ze vzduchu obecně. Vodní pára se samovolně šíří difúzními pochody z míst o vyšším částečném tlaku vodní páry do míst s nižším částečným tlakem. Částečný tlak syté vodní páry závisí na teplotě, a tak tato difúze probíhá vždy z prostředí s vyšší teplotou do prostředí s teplotou nižší. Jelikož je pro všechny samovolné děje v přírodě typické, že směřují k vyrovnání tlaků, koncentrací a teplot, dochází k prostupu par skrz obvodovou konstrukci z exteriéru do interiéru v našich klimatických podmínkách pouze v letním období. Kdežto po dobu větší části roku (asi 9 měsíců v roce) se v běžných tuzemských podmínkách pára šíří difúzí z teplejšího vnitřku budovy ven do chladnějšího venkovního prostředí. Ochranná vrstva obvodové konstrukce tedy musí nejen zabránit smáčení obvodové konstrukce srážkovou vodou, ale musí mít i nízký



difúzní odpor. Vývoj nových aplikací povrchových úprav by mohl docílit prodloužení životnosti, zlepšení tepelně technických a vlhkostních vlastností a taktéž vlastností estetických. [10, 11]

Hlaváč a kol [10] mimo jiné testovali i propustnost pro vodní páry u několika nanotextilií na bázi polyvinylalkoholu. Jednalo se o experimentální měření zaměřené na dlouhodobou ochranu povrchů stavebních konstrukcí před negativními vnějšími vlivy. Experimenty probíhaly dle normy ČSN EN ISO 12572 Tepelně vlhkostní chování stavebních materiálů – Stanovení prostupu vodní páry. Využito bylo metody wet cup, při které byly sledovány hmotnostní úbytky jednotlivých vzorků. Podle této normy byly na šesti vzorcích měřeny faktory difúzního odporu nanotextilií (viz obrázek 9 a). Po vyhodnocení experimentu se ukázalo, že sledovaný faktor difúzního odporu se blíží jedné, tedy  $\mu=1$ . Tato bezrozměrná veličina vyjadřuje, kolikrát je větší difúzní odpor příslušného materiálu ve srovnání s klidnou vrstvou vzduchu o stejné tloušťce a stejné teplotě. [12]



Obrázek 9 a) Měřící komora v průběhu měření paropropustnosti; b) Ochrana dřevěného povrchu pomocí nanočástic [10]

Součástí studie byla také kromě měření paropropustnosti sledována možná aplikace nanočástic sloužících k ochraně povrchů stavebních konstrukcí. Takové látky na principu nanotechnologie mohou obsahovat například nanočástice oxidu křemíku, stříbra, titanu či jiných prvků s biocidním účinkem zneškodňujícím celou řadu mikroorganismů. Na dřevěném materiálu současně vznikne z nanočástic hydrofobní povrch, na kterém jsou takové nanočástice (molekuly), které nenesou žádný náboj. Jelikož v molekule převažují nepolární vazby, netvoří s vodou téměř žádné vodíkové můstky, a proto se ve vodě nerozpouštějí. Princip ochrany je zobrazen na obrázku 9 b).



Experimentálně byla pozorována reakce na plíseň při ošetření vzorku nanočásticemi oxidu titaničitého. Ošetřené vzorky nebyly po uplynutí doby 50 dnů napadeny houbovými zárodky, kdežto u neošetřeného materiálu byl stupeň kolonizace až 80 %. Uvedené výstupy potvrzují, že povrchové úpravy na bázi nanovláken mohou poskytnout dostatečnou dlouhotrvající ochranu dřevěných konstrukcí díky nanočásticím s biocidními účinky a zároveň mají nízký difúzní odpor. [10, 11]

## 1.5 Využití nanotextilií při restaurování omítek

Pro zpevňování historických budov se nejčastěji používají prostředky na bázi disperzí akrylových kopolymerů, prostředky na bázi organosilikátů nebo několikanásobná aplikace vápenné vody. Propojení nanovláknenné membrány se zdívkou by bylo teoreticky možné pomocí těchto tzv. konsolidantů čili zpevňovačů silikátových materiálů. Jejich schopností se využívá při restaurování historických budov, soch či jiných objektů ze silikátových materiálů (kámen, keramická hmota, malta, omítky, štuky apod.) Konsolidanty jsou v principu kapaliny, které se po proniknutí do porézního systému přemění na pevnou látku, zajišťující pojivou funkci mezi dezintegrovanými částicemi. U anorganických látek se obvykle jedná o roztoky, které po impregnaci ztrácejí rozpouštědlo – nejčastěji vodu – a často po chemické reakci vytvářejí vlastní pojivou hmotu.

Tradičním konsolidantem ze skupiny anorganických látek je vápenná voda (čirý roztok hydroxidu vápenatého ve vodě), která na jedné straně u mnohých pracovníků památkové péče nachází značné zastání, na druhé straně řada pracovníků především z řad odborníků s technickým a technologickým vzděláním ji považuje za dnes již překonanou. [13]

V současné době jsou dostupné i modernější technologie než vápenná voda. Špičkou ve svém oboru je CaLoSil® - koloidní disperze  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  v alkoholových rozpouštědlech (viz obrázek). Je to první komerčně dostupný konsolidant založený na nanosuspenzích hydroxidu vápenatého. Od října 2006 jej vyrábí firma IBZ-Freiberg (Ingenieurbüro Dr. Ziegenbalg GbR). CaLoSil® je sol obsahující stabilní nanočástice hydroxidu vápenatého rozptýlené v rozličných alkoholech jako etanol, n-propanol a isopropanol nebo případně i nepolární rozpouštědla jako např. pentan. Je dostupný v koncentraci 5, 15, 25 a 50 g/l. (Jen pro porovnání, obsah hydroxidu vápenatého v nasycené vápenné vodě se pohybuje okolo 2,2 g/l). Přípravek je určen hlavně ke konsolidaci karbonátových materiálů.

Střední velikost částic je cca 150 nm, což je zhruba stokrát menší velikost částic než u "běžných" vápenných suspenzí. Díky extrémně nízké velikosti částic je tento konsolidant potenciální možností zpevňování karbonátových materiálů jako vápenec,

mramor či vápenné malty a omítky. Nanesený CaLoSiL® vytvoří po odpaření rozpouštědla pevný hydroxid vápenatý, který se přemění na  $\text{CaCO}_3$  podobným způsobem jako tradiční vápenné omítky reakcí s atmosférickým oxidem uhličitým. [13, 14]

V případě aplikace nanovláknenné vrstvy by po impregnaci zdiva následovala aplikace membrány ještě na vlhký roztok konsolidantu. V tomto případě by bylo vhodné doplnit membránu o nosný prvek zajišťující požadovanou pevnost. V současné době již Šmidtová a Krofrová provedly studii [15], která možnou aplikaci nanotextilie na konkrétně historickou budovu testovala. Aplikace byla testována v laboratorních podmínkách. Jelikož přilnavost samotných nanotextilií je k povrchu omítky prakticky nulová, bylo za účelem zajištění přilnavosti testováno několik prostředků jako pojiv. Nanotextilie byla nanesena na hrubou stranu vzorku omítky, který byl opatřen příslušným aplikačním prostředkem. Nanesená nanotextilie byla následně houbičkou přitlačena na povrch vzorku (obrázek 10).



Obrázek 10 Zkušební vzorek historické omítky s nanotextilií a jeho snímek z elektronového mikroskopu [15]

Hodnocení výsledků bylo prováděno subjektivně na základě vizuálního posouzení, zkoušky vrypem a odhadem hloubky penetrace nanotextilie s aplikačním roztokem. Závěrem této studie je, že možnost sanace historických omítek nanotextiliemi je výrazně ovlivněna výběrem polymerů a způsobem aplikace. Nelze tedy momentálně jednoznačně určit schopnosti jednotlivých pojiv a je tedy nutný další výzkum pro potvrzení či zamítnutí hypotézy, zda je možné membránu ve stavebnictví takto aplikovat. [15]

## **2. Používané materiály ve stavebnictví**

### **2.1 Bariérové materiály na obalových konstrukcích**

Ve stavebnictví se při konstrukci plášťů staveb používají tři druhy bariérových materiálů, které jsou vyrobeny za různým účelem. Mezi první dvě patří parobrzdy, které slouží k regulaci difúzního toku, a parozábrany, které mají bránit jakémukoli proudění vzduchu v tepelné izolaci. V současné době je však jasně patrný trend konstruovat stavby prodyšné – difúzně otevřené. Proto jsou bariérové materiály často koncipované pro zvládnutí vlhkostního režimu, tedy hlavně řízení toku vodní páry tak, aby nedocházelo k její kondenzaci v konstrukci. Při výrobním postupu se postupuje vytvořením mikropórů mechanickou cestou do vyráběné fólie. Četnost těchto mikrootvorů na jednotce plochy ve fólii a jejich velikost pak určuje velikost difúzního odporu. Rovnoměrnost mikrootvorů a jejich velikost jsou však omezené. Problémem se tedy stávají bariérové vlastnosti, které jsou nedostatečně říditelné a nepříliš stabilní.

Třetím typem materiálu jsou pojistné hydroizolace, které se používají jako bariéra před průnikem vlhkosti. Jejich primárním účelem je pojistka proti zatékání vody do podkroví. Na tyto materiály jsou kladeny i další požadavky. Je to například maximální difúzní otevřenost, hydrofobní povrch a odolnost proti protržení. [2, 16]

### **2.2 Hydroizolační materiály**

Pro utěsnění podkladů před lepením pokládkou keramických obkladů a dlažby je možné použít izolační pásy. Určeny jsou především do míst výrazně zatížených vlhkostí jako jsou koupelny, veřejné bazény, lázně, sauny a průmyslové oblasti jako například pivovary, mlékárny, komerční kuchyně apod. Tyto izolační pásy se aplikují následujícím postupem. Pásy, které jsou dodávány v roli, se přiloží k podkladu a nařezají se na požadované rozměry. Následně je na podklad nanesena zubovou stěrkou lepicí malta. Do čerstvého maltového lože se aplikují izolační pásy, které se přitlačí do malty gumovým válečkem nebo hladkou stranou hladítka. Jednotlivé přesahy pásů jsou slepeny utěšňovacím tmelem. Následně mohou být na pásy bez čekací doby na pásy nalepeny keramické obklady.

Takovým výrobkem je například Utěšňovací a oddělovací podložka CL 69 Ultra Dicht ze systémového řešení Ceresit. V tomto případě se jedná o oboustranně kaširovanou polyetylenovou tkaninu. Výrobce deklaruje vodotěsnost a parotěsnost výrobku, nicméně otázkou je, zda absolutní zábrana proudění vodní páry skrz zdivo je skutečně výhodou. Postup při aplikaci tohoto výrobku je znázorněn na obrázku 11. [17]



Obrázek 11 Aplikace hydroizolačních pásů [17]

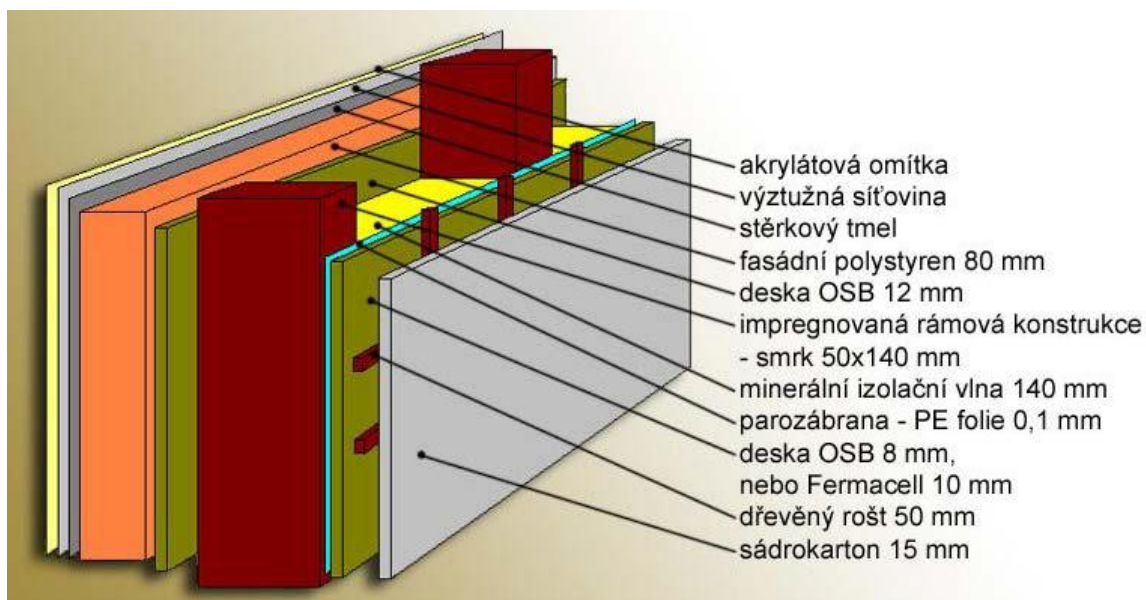
## 2.3 Konstrukce dřevostaveb

V poslední době se začala ve stavebnictví výrazně prosazovat filosofie zdravého bydlení. Důvodem je mimo jiné moderní trend využívání ekologických materiálů. Současně se podařilo prokázat i tzv. syndrom nemocných budov (SBS). Jedná se o problematiku chronických onemocnění některých uživatelů budov. Tito lidé často trpí dýchacími obtížemi, bolestmi hlavy či alergií. Vznik SBS způsobuje především přítomnost rizikových látek v ovzduší budov, které se uvolňují při použití zdravotně závadných stavebních materiálů, a příliš těsné, ne-li přímo hermeticky uzavřené vnitřní prostředí budovy od vnějšího a současně nesprávně probíhající výměna vzduchu. Z tohoto důvodu se prosazuje snaha konstruovat tzv. difúzně otevřené konstrukce. To obnáší výrobu obalových konstrukcí (plášťů budov) tak, aby umožňovaly difúzi plynů a vodních par. Difúzně otevřené konstrukce navíc umožňují řešit některé problémy hygieny prostředí jako například povrchové plísně v interiérech budov a zároveň významně přispívají k regeneračním schopnostem konstrukce v případě vlhkostní havárie.

Tyto difúzně otevřené konstrukce mají pro oblast dřevostaveb velký význam, kde v současnosti využívané metody značně zaostávají za moderními požadavky kladenými na budovy. Vzhledem k tématu této práce se budeme dále zabývat především sendvičovými konstrukcemi dřevostaveb. V poslední době dřevostavby zažívají i v českých zemích nebývalý rozmach. Dle nejnovějších statistik připadá na dřevostavby až deset procent českého stavebního trhu. [18]

Jelikož většinu dřevostaveb tvoří dřevěná rámová konstrukce, panuje zde obava z biologické degradace dřeva v důsledku nadměrného hromadění vlhkosti. Z tohoto důvodu je snaha nepřipustit vstup vodní páry do konstrukce, a proto se ze strany

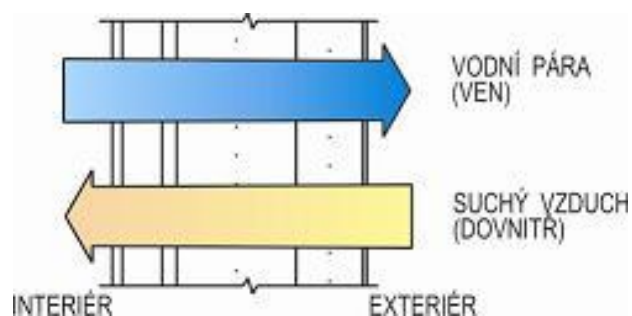
interiéru do konstrukce vkládá parozábrana (většinou polyethylenová fólie). Současný konstrukční koncept je uveden na obrázku 12. Vlivem užití parozábrany se však interiér stává neprodyšným, hermeticky uzavřeným prostorem. Tento fólií tvořený obal konstrukce je pouze místy přerušen okny či dveřmi, které jsou však stejně kvalitně, tj. hermeticky, uzavřeny. Přičemž vyvstává otázka, jaká je pak kvalita prostředí uvnitř takové budovy, kde řešení problému pomocí umělého větrání je účinné jen do té míry, do jaké je možné zaručit mikrobiologickou čistotu vzduchotechnických rozvodů. Mimo to tento koncepční typ dřevostavby trpí následujícími problémy. Je to například mizivá regenerace při vlhkostní havárii, malá vlhkostní stabilita interiérů a konstrukčně nestabilní řešení vzhledem k závislosti spolehlivosti celé konstrukce na neporušenosti parozábrany.



Obrázek 12 Současná konstrukce dřevostaveb [18]

Z tohoto důvodu začíná být snahou konstruovat takové skladby konstrukcí, které neobsahují žádné parozábrany, které by bránily prostupu vodních par a suchého vzduchu stěnou či střechou. To má pozitivní vliv na kvalitu vnitřního mikroklimatu ze zdravotního hlediska a umožňuje „dýchání“ konstrukcí stěn a střešních plášťů (obrázek 13). [18]

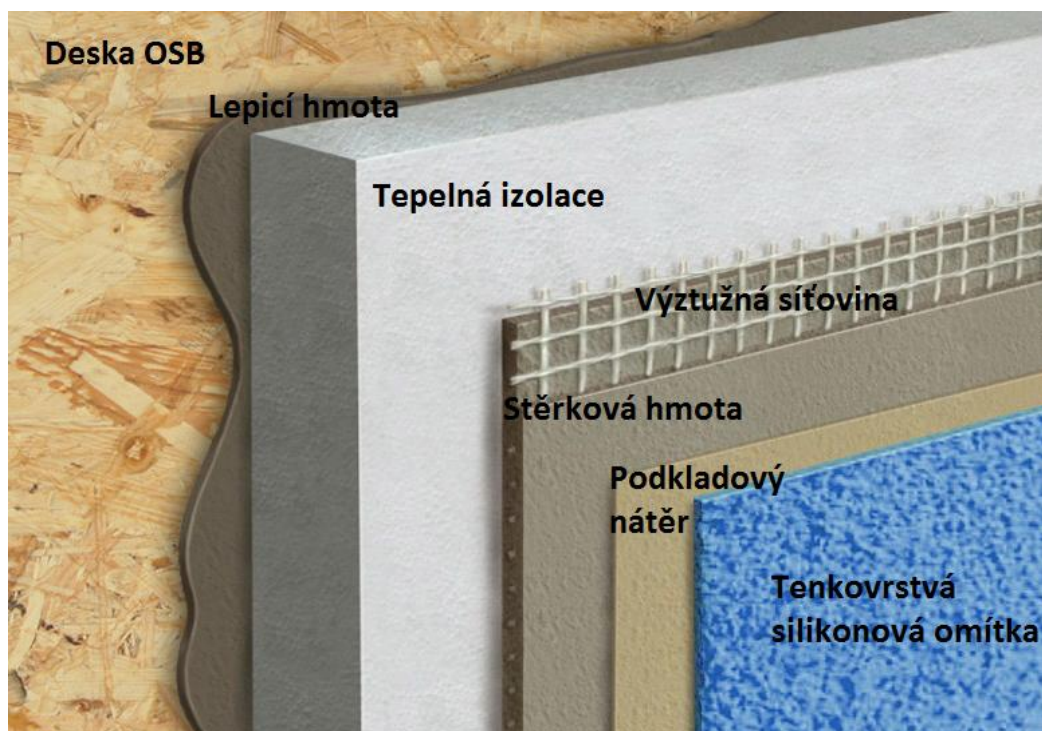




Obrázek 13 Difúzní otevřenost konstrukcí [18]

## 2.4 Pojení stavebních vrstev

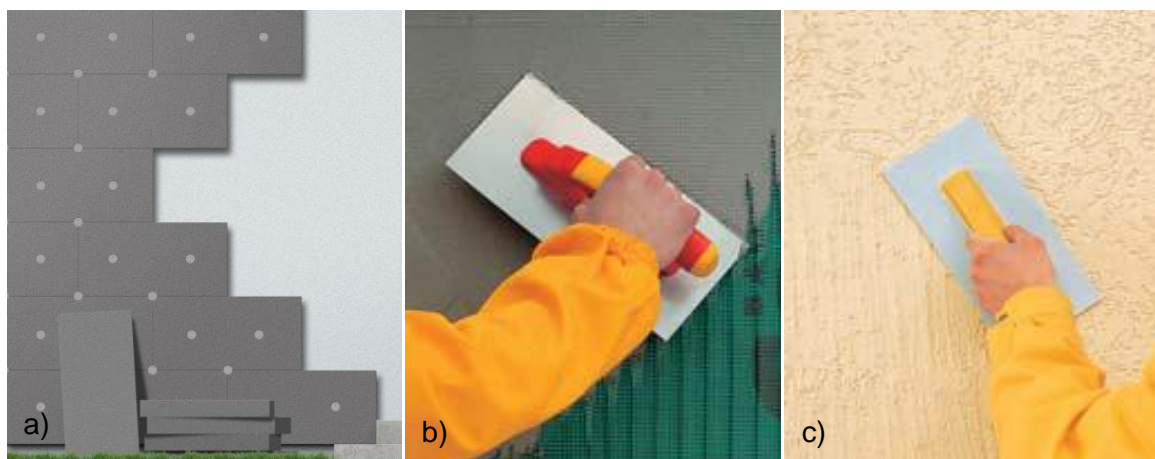
Při plánování začlenění nového funkčního prvku do fasády domu je třeba zohlednit v praxi používané materiály. Důležitým předpokladem je vhodná kombinace se stavebním materiálem, jehož vlastnosti by nebránily funkčnosti membrány. Začlenění membrány lze uvažovat do zateplovacích systémů budov. Nároky na tepelně technické parametry obvodových konstrukcí neustále stoupají, a tak lze trend zateplení obvodového pláště zaznamenat nejen u nově stavěných objektů, ale i u sanací a rekonstrukcí dříve postavených objektů. Kontaktní tepelně izolační systémy obvodových plášťů budov používají tepelné izolanty na bázi polystyrénových desek nebo desek z minerálních vláken, připevněných na fasádu lepením a hmoždinkami, s výstužnou vrstvou a povrchovou tenkovrstvou omítkou. [19]



Obrázek 14 Zateplovací systém pro dřevostavby [20, 21]

Vnější kontaktní zateplovací systém (označovaný mezinárodní zkratkou ETICS) je nejrozšířenější technologií v České republice, kterou lze zlepšovat tepelnětechnické parametry obvodových plášťů budov. Na obrázku 14 je uveden náčrtek zateplovacího systému pro dřevostavby. [20, 21]

Zateplovací práce začínají přípravou podkladu, jeho případným čištěním, ošetřením a vyrovnaním. Následuje aplikace tepelné izolace lepením a kotvením k připravenému pevnému a soudržnému podkladu (obrázek 15 a). Samotný způsob lepení a kotvení záleží na technologickém předpisu výrobce. Na tepelnou izolaci se natahuje tzv. základní vrstva složená ze stěrkové hmoty. Do této vrstvy se hladítkem vtlačuje skleněná výztužná síťovina, na kterou se obvykle natahuje další vrstva stěrkové hmoty (obrázek 15 b). Po úplném vyschnutí vrstvy vyztužené síťovinou se obvykle nanáší podkladový nátěr pro vyrovnaní nasákavosti podkladu a zvýšení přilnavosti omítky. Na dokončenou základní vrstvu se již nanáší tenkovrstvá omítka se zatíranou nebo rýhovanou strukturou (obrázek 15 c). Omítka se nanáší na podklad rovnoměrně v tloušťce zrna pomocí nerezového hladítka. Na trhu existuje několik typů tenkovrstvých omítek pro zateplovací systémy. Jsou to omítky akrylátové, silikonové, silikátové a minerální. První tři typy se dodávají ve formě již připravených past v nádobách. [20]



Obrázek 15 Postup montáže zateplovacího systému a) tepelná izolace; b) stěrková hmota; c) omítka [20]

### 3. Vlhkostní funkce stavebních materiálů

Vlhkostní funkce staveb je momentálně aktuální problematikou. Z dlouhodobého hlediska je třeba vlhkost budov řešit, ať už se jedná o vlhkost vzniklou v běžných podmínkách nebo za extrémních situacích během přírodních katastrof jako jsou povodně či prudké deště. Začleněním nového materiálu do konstrukce by teoreticky bylo možné vlhkost omezit nebo jí dokonce zamezit.

Aktuálnost tématu je dána i stále vyššími požadavky na kvalitu a komfort vnitřního prostředí budov. Zároveň je kladen důraz na snížení ekonomické náročnosti, což vede k výstavbám nízkoenergetických či pasivních domů. Tyto domy mají výrazně nižší spotřebu energie než budovy navrhované dle platných technických standardů. Alarmující je, že provozu budov je připisováno 25% celkové celosvětové spotřeby energie (stav v roce 2010), což je třetí největší spotřeba za průmyslem a dopravou. Do budoucna se sice počítá se snížením energie na provoz budov, ale předpokládaným poklesem je pouze 5%. Z tohoto důvodu jsou již navrhovány nové typy tepelně-izolačních materiálů, například na základě modifikace mikrostruktury materiálů (aplikace nanomateriálů), vakuových panelů, vyplňování zdících bloků apod. Pro návrhy nových materiálů a technologií je třeba zohlednit jejich chování v reálných podmínkách, kterým bude stavební konstrukce vystavena. [22]

Zvýšená vlhkost staveb negativně ovlivňuje jejich užité vlastnosti a trvanlivost. Neméně podstatný vliv je na kvalitu vnitřního prostředí budov z hygienického hlediska. Zvýšená vlhkost způsobuje závažné negativní důsledky jako například degradaci materiálu (rozpad pevné struktury anorganických malt, porézních kamenů, keramických cihel, rozklad pojiv apod.). Toto téma je velmi důležité z hlediska stavebního výzkumu a praxe, neboť nadměrná vlhkost způsobuje biologické znehodnocení konstrukcí. Nárůst vlhkosti významně souvisí s poklesem mechanické pevnosti materiálů a také se zhoršením jejich tepelně – izolační funkce. [22] Z těchto negativních skutečností vyplývá, že je nutné zamezit pronikání vlhkosti do stavebních konstrukcí a to po celou dobu jejich životnosti. Je tedy třeba vyřešit odolnost aplikovaných materiálů se shodnou životností jako stavba nebo možnost opakované aplikace na zdivo a tím neomezené trvanlivosti systému.

#### 3.1 Šíření vlhkosti

Při aplikaci materiálu s ochrannou funkcí proti pronikání vody je třeba zohlednit možnosti vzniku a zdroje vlhkosti. K šíření vlhkosti může obecně docházet třemi různými způsoby. Jedná se o difúzi vodní páry, šíření vlhkosti v kapalném stavu – proudění vody nebo transport vlhkosti jako pevné látky (led, námraza). Zdrojů vlhkosti



může být několik. Za prvé můžeme hovořit o stavební vlhkosti, což je vlastně vodní pára vázaná v materiálech v důsledku mokrých technologických procesů. Tzv. zemní vlhkost díky kapilárnímu jevu (vzlínavost) může vystoupit 2 – 3 metry nad úroveň zeminy. Dále se jedná o meteorologickou vlhkost (déšť, sníh) a zkondenzovanou vlhkost ze vzduchu, při které dochází k vsakování zkondenzované vody. Neopomenutelná je také provozní vlhkost pocházející z člověka, zvířat či technologických procesů jako je bazén, vaření, praní apod. Díky hydroskopičnosti vniká do konstrukce sorpční vlhkost. K sorpci vlhkosti v materiálu dochází při vzrůstu vlhkosti vzduchu. Naopak při poklesu vlhkosti vzduchu dochází k desorpci vlhkosti z materiálu. [23]

### **3.2 Vlhkostí problémy staveb**

V důsledku vysoké relativní vlhkosti vzduchu stoupá vlhkost zdiva. Důsledky této vlhkosti jsou jednak estetické, ale dochází také ke zhoršení vnitřního prostředí zpravidla v podobě plísní a mnohdy i k narušení konstrukce stavby (její tepelně – izolační vlastnosti, únosnost atd.). Může tak docházet k opadávání omítek, narušení vlhkého zdiva mrazem či rezavění kovových prvků. [23] Těmto problémům je třeba předcházet, nikoli je řešit zpětně. Možným řešením je metodika zabraňující průniku vlhkosti do konstrukce staveb pomocí aplikovaného nanovláknenného materiálu.

### **3.3 Metody stanovení tepelně-vlhkostí funkce**

Pro výzkum nového materiálu je znalost tepelně-vlhkostního chování staveb nezbytnou informací. Pro stanovení této funkce stavebních materiálů, konstrukcí a budov lze využít čtyři principy, které jsou uvedeny níže.

- 1) Transport tepla a vlhkosti lze odhadnout pomocí počítačového modelování s experimentálním zjištěním vstupních parametrů materiálu. Tento způsob je velmi oblíbený, avšak je otázkou, jak spolehlivé toto modelování je. Problematické bývá zadání vstupních parametrů naměřených experimentálně, které musí odpovídat předpokládanému klimatickému zatížení. To však často z časového a finančního hlediska není možné.
- 2) Fyzikální parametry materiálů je také možné zjistit provedením experimentů v laboratorních podmínkách. Na základě výsledků z těchto měření je následně proveden odhad reálného chování materiálu v běžných klimatických podmínkách a v širším časovém horizontu. Tento způsob je ale obtížně kvalifikovatelný, používají se proto spíše jako doprovodný nástroj při navrhování budov.

- 3) Měření lze provádět přímo na sledovaných stavbách popř. na testovacích budovách v reálném prostředí a čase (měření in-situ). Během měření je kontinuálně monitorován obsah vlhkosti, relativní vlhkost, teplota, kapilární tlak a další vlastnosti. Vše je prováděno v reálných podmínkách konstrukce. Současně je možné odebírat vzorky materiálů a ty pak podrobit laboratorní analýze. Velkou nevýhodou této metody je nesporně časová a finanční náročnost. I přesto je v praxi často používán, především při finálním testování nových materiálů a aplikačních technologiích. Na obrázku 17 je znázorněn příklad testovací budovy, na které probíhá sledování různých typů obvodových plášťů a střešních konstrukcí. [22]



Obrázek 16 Příklad testovací budovy [22]

- 4) Optimalizovanou metodou je „Semi – Scale“ analýza. Jedná se o experimentální analýzu, která tvoří mezistupeň mezi měřením in – situ a počítačovým modelováním s experimentálním zjištěním vstupních parametrů materiálu. Díky této metodě je dosaženo velké přesnosti měření. Princip samotných experimentů je založen na simulování klimatických podmínek působících na konstrukci, která je umístěna v testovacím tunelu mezi klimatickými komorami. [22]

### ***Hodnocení šíření vodní páry dle ČSN***

Metody stanovení tepelně-vlhkostí funkce podléhají určitým normám. V České republice se v současné době transport vlhkosti v obalových konstrukcích budov nejčastěji vyhodnocuje pomocí Glaserovy metody, která je popsána ve dvou technických normách ČSN 730540 a ČSN EN ISO 13788. [24] Jak již bylo zmíněno, hodnocení šíření vodní páry konstrukcí je velmi důležitá úloha stavební tepelné

techniky. Slouží především k ověření teplotně-vlhkostního charakteru staveb z dlouhodobého hlediska. V úvodu normy ČSN EN ISO 13788 je uvedeno, cituji:

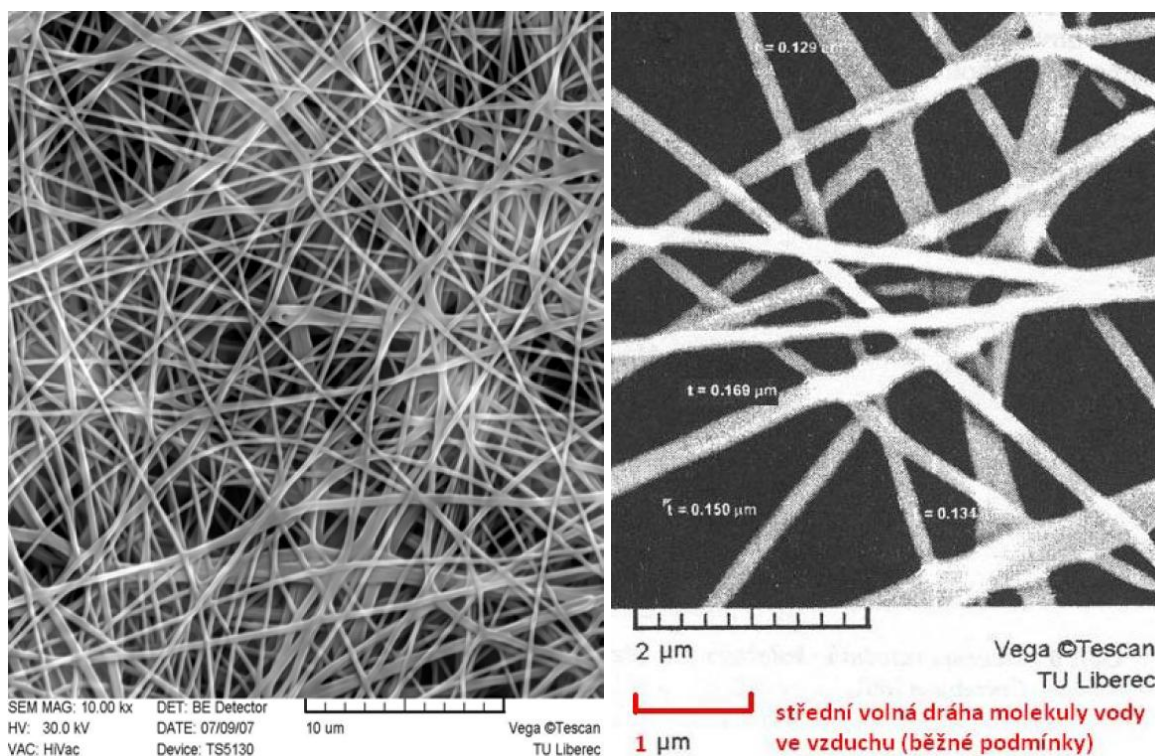
*„Šíření vlhkosti je velmi komplexní děj a znalost mechanismů šíření vlhkosti, vlastností materiálů, počátečních a okrajových podmínek je často nedostatečná, neodpovídající a dosud ve vývoji. Proto tato norma předkládá jednoduché výpočtové metody, založené na zkušenosti a obecně uznávaných znalostech. Normalizace těchto výpočtových metod nevylučuje užívání jiných lépe odpovídajících metod. Výpočty obvykle vedou ke správným návrhům na straně bezpečnosti, a jestliže tento postup poukáže prostřednictvím návrhového kritéria na konstrukční nedostatky, pak mohou být použity přesnější metody k prokázání, že konstrukce požadavky splní. Tato norma pojednává o kritické povrchové vlhkosti a kondenzaci uvnitř konstrukce, a nezahrnuje další formy vlhkosti, jako je zemní vlhkost, atmosférické srážky, zabudovanou vlhkost a proudění vlhkosti, které mohou být uvažovány při návrhu stavebního dílce.“ [24]*

## EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

### 4. Charakteristika testovaných materiálů

#### 4.1 Nanovláknenná membrána

Zadáním této diplomové práce bylo prozkoumat možnosti aplikace nanovláknenné vrstvy za účelem ochránit stavbu před vlhkostí a zároveň umožnit stavbě „dýchat“ díky paropropustnosti, tedy zamezení kumulace výparů vzniklých v běžném provozu uvnitř stavby. Na katedře hodnocení textilií TUL byla vyvinuta a patentována metoda výroby nanovláknenné vrstvy, která vykazuje lepší parametry než membrána GORE-TEX. [25] Tato membrána byla podrobena určitému typu testování, kterému je věnována experimentální část práce. Pro experimentální měření byla použita nanovláknenná membrána vyrobená firmou Nanomebrane, která je vyrobena z polyamidu 6. Polyamid 6 byl objeven Paulem Schlackem v roce 1938 (firma A.G.Farben) a v Československu se vyráběl pod názvem SILON. Polyamidy mají široké použití. Využívá se především jejich tvrdosti, únosnosti, malého koeficientu tření a vysoké odolnosti vůči otěru. Na rozdíl od polyuretanů a polytetrafluorethylenů jsou šetrnější k životnímu prostředí. Nemísí se s rozpouštědly a nezůstává po nich nebezpečný odpad. Z toho důvodu jsou i membrány vyrobené z tohoto materiálu ekologičtější. [26]



Obrázek 17 Porovnání velikosti pórů se střední dráhou molekuly vodní páry [2]

Bariérové vlastnosti membrán jsou principiálně řiditelné, což vyplývá z mikrostruktury nanotextilie. Na obrázku 17 je znázorněna typická struktura vláken vyrobených technologií Nanospider (střední hodnota průměru vláken 150 – 200 nm). Současně je uveden snímek demonstrující, že velikost pórů mezi vlákny v nanotextilii je srovnatelná se střední dráhou molekuly vodní páry (za obvyklých podmínek řádově 1000 nm). [2]

### ***Testovaná membrána***

Pojem membrána představuje tenkou homogenní strukturu, která tvoří rozhraní mezi jednotlivými prostředími. Testovaná membrána je původně určena pro oděvní použití. Hlavním úkolem oděvních membrán je zvýšení komfortu uživatele. Využívá se především vlastností jako jsou paropropustnost, nepromokavost a větruodolnost. Polymerní membrány jsou vyráběny nejčastěji z polytetrafluorethylenu, polyesteru a polyuretanu. V současné době se v oděvním průmyslu využívají membrány mikroporézní a hydrofilní. Princip využívaných membrán je založen na určitém poměru pórů membrány k velikosti molekuly vody a vodních par. Póry textilie tak umožňují prostup vodní páry při současné ochraně proti vniknutí vody. V oděvním odvětví se membrány laminují na určitý textilní nosič. Důvodem je, že membrány jako takové jsou obtížně zpracovatelné. Pojem laminace označuje trvalé spojení dvou a více textilních či netextilních materiálů pomocí pojiva, tepla a tlaku. [27]

- ***Membrána Nanomebrane***

Nanomembrane je nanovláknenná membrána vyráběná stejnojmennou českou společností. Od jiných komerčně dostupných membrán se liší použitým materiálem. Je vyrobena z polyamidu 6. Tento materiál má vysokou tepelnou stálost a to i při extrémně nízkých a vysokých teplotách. Membrána Nanomembrane je vysoce hydrofobní, což zajišťuje vysokou hydrostatickou odolnost. Firma deklaruje hydrostatickou odolnost materiálů s touto membránou až 30 m vodního sloupce. Zároveň nabízí i vynikající paropropustné schopnosti převyšující jiné konkurenční výrobky. Hodnota výparného odporu Ret je zde 0,0 při 2g/m<sup>2</sup>.

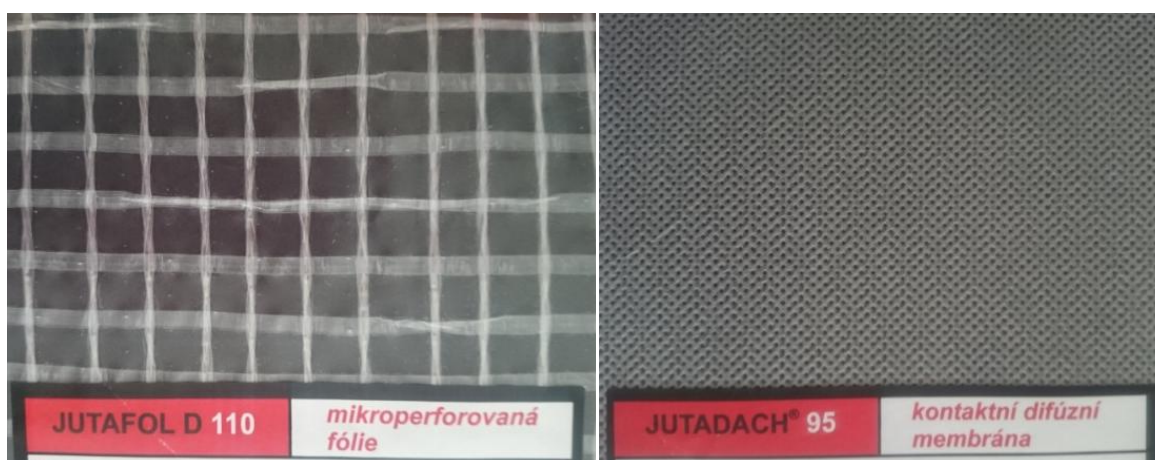
Na obrázku 18 je znázorněn prostup páry celým materiálem a zabránění průniku vody skrz membránu. Uvedený příklad znázorňuje třívrstvý laminát pro oděvní účely, který kromě membrány obsahuje i vrchní materiál a podšívku. [26]



Obrázek 18 Nanovláknenná membrána Nanomembrane [26]

## 4.2 Pojistné hydroizolace

Dále byly otestovány i materiály, které se ve stavebnictví používají pro ochranu stavby proti průniku vody, a zároveň u nich výrobce deklaruje jejich dobrou propustnost vodních par. Konkrétně se jedná o mikroperforovanou fólii a difúzní membránu. Ukázka obou testovaných materiálů je uvedena na obrázku 19.



Obrázek 19 Pojistné hydroizolace

Prvním pozorovaným materiálem byla mikroperforovaná fólie Jutafol D 110 od společnosti JUTA a.s. Jedná se o třívrstvý materiál složený ze dvou vnějších vrstev z polyetylenové fólie, které plní funkci hydroizolační a paropropustnostní. Uvnitř je zpevněna polyetylenovou armovací mřížkou zajišťující pevnost materiálu. Tato fólie je vyráběna v čiré barvě. Paropropustnost zajišťuje materiálu mikroperforace, a tak umožňuje odvětrání vodních par z interiéru budovy. Současně chrání podkroví proti vlhkosti z deště nebo sněhu v případě protečení střešní krytinou nebo zafoukání. [16]



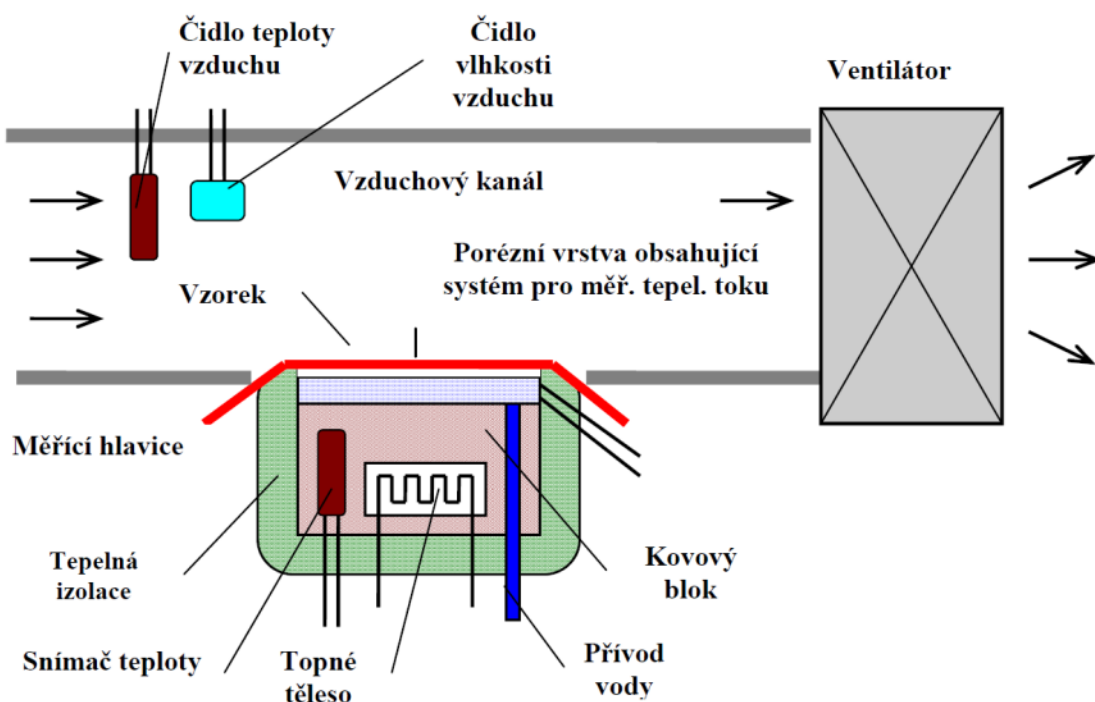
Jako druhý materiál byla vybrána kontaktní difúzní membrána Jutadach 95 od téže firmy. Je to materiál složený ze tří vrstev. Vnější vrstvy jsou vyrobeny z polypropylenové netkané textilie použité pro pevnost materiálu. Hydroizolační funkci s vysokou paropropustností zajišťuje vnitřní vrstva z polypropylenového difúzního filmu. Tento materiál odvádí vodní páry z konstrukce ven a zároveň nabízí ochranu před deštěm a před sněhem. [16]

## 5. Metodika

Vlastnostmi, které byly v experimentální části práce sledovány, jsou paropropustnost, prodyšnost a hydrostatická odolnost. Testovaná membrána byla nejprve podrobena testům samostatně. Bylo využito standardně používaných metod pro textilní materiály, přičemž princip zařízení a způsob měření je popsán v následujících podkapitolách. Dále byla testována propustnost vody membrány se stavebním podkladem nově navrženou metodou.

### 5.1 Paropropustnost

Pro měření paropropustnosti textilního materiálu se využívá přístroj Permetest, který byl vynalezen profesorem Lubošem Hesem na katedře hodnocení textilií Technické univerzity v Liberci.



Obrázek 20 Schéma přístroje Permetest [28]

Přístroj je založený na přímém měření tepelného toku  $q$ , který prochází povrchem měřicí hlavice. Tento povrch, na který je měřený vzorek přes separační fólii umístěn, je porézní a je zvlhčován. Vnější strana vzorku je následně ofukována. Měření na tomto přístroji je v souladu s normou ČSN EN ISO 11092. Schéma přístroje je uvedeno na následujícím obrázku 20.

Na přístroji je měřena relativní paropropustnost textilií  $p$  [%]. Tento parametr udává, že 100% propustnost textilie pro vodní páry představuje tepelný tok  $q_0$ , ke kterému by došlo odparem z volné vodní hladiny, která by měla stejný průměr jako zkoušený vzorek. Pokud je tato hladina zakryta vzorkem, tepelný tok se sníží na hodnotu  $q_v$ . Relativní paropropustnost definuje následující rovnice:

$$p_{rel} = \left( \frac{q_v}{q_0} \right) 100 \text{ [%]} \quad (1)$$

Dalším parametrem je výparný odpor  $R_{et}$  [ $\text{Pa} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{W}^{-1}$ ], který souvisí s parciálním tlakem vodní páry ve vzduchu. Parciální tlak  $P_a$  je určen z relativní vlhkosti vzduchu a jeho teploty. Parciální tlak nasycené vodní páry  $P_m$  je funkcí teploty vzduchu naprogramované v přístroji. Výparný odpor platí:

$$R_{et} = (P_m - P_a)(q_v^{-1} - q_0^{-1}) \text{ [28]} \quad (2)$$

## 5.2 Prodyšnost

Měření prodyšnosti textilie se provádí na přístroji FX 3300 švýcarské firmy TEXTTEST, který je uveden na obrázku 21. Prodyšnost je charakterizována jako schopnost materiálu propouštět vzduch za daných podmínek. Při laboratorním měření se prodyšnost hodnotí dle normy ČSN EN ISO 9237. Definice označuje prodyšnost jako rychlost vzduchu, který proudí přes testovaný vzorek za specifikovaných podmínek. Nastavit je možné tlakový spád (např. 100, 200 Pa) a měřenou plochu ( $5 - 20 \text{ cm}^2$ ). Výsledná prodyšnost textilie je vyjádřena v  $\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$ . [28]



Obrázek 21 Přístroj FX 3300 pro měření paropropustnosti textilií [29]

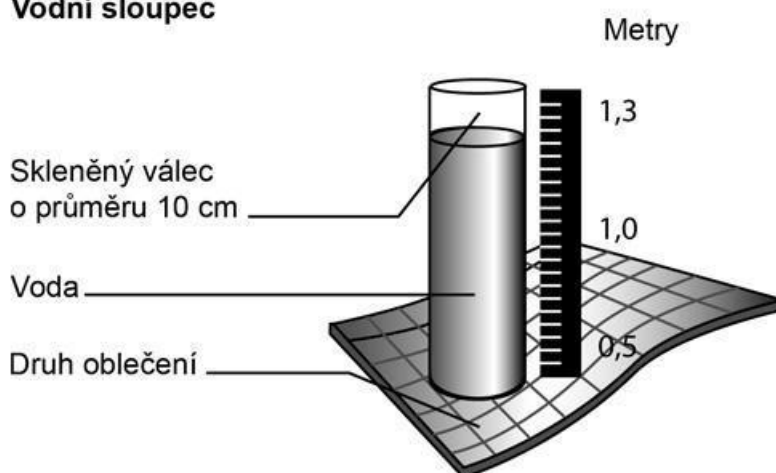


### 5.3 Hydrostatická odolnost

Stanovení odolnosti textilií proti pronikání vody se většinou realizuje zkouškou tlakem vody. Tato odolnost je vyjádřena výškou vodního sloupce, kterou materiál udrží. Měření musí probíhat dle normy ČSN EN 20811. Testování je možné provádět na přístroji Hydrostatic Head Tester M018. Principem zkoušky je postupné zvyšování tlaku destilované vody, který působí přímo na testovaný materiál o ploše 1 dm<sup>2</sup>. Tlak vody působí tak dlouho, dokud nedojde na třech místech k proniknutí vody. Výsledným parametrem je tlak, při kterém voda pronikne plošnou textilií na třetím místě. Tlak vody působí v případě tohoto přístroje zespodu. Podle normy je ale možné působení i shora. Hodnota tlaku se pro lepší orientaci převádí na výšku vodního sloupce milimetrech či metrech.

Jednoduše si lze princip této zkoušky představit jako skleněný válec o průměru 10 cm umístěný na měřený vzorek. Válec je naplněn vodou, která působí na vzorek. Po průniku prvních tří kapek se zaznamená výška působícího vodního sloupce, která určuje hydrostatickou odolnost materiálu. Tento princip je znázorněn na obrázku 22. [27, 28]

#### Vodní sloupec



Obrázek 22 Princip měření hydrostatické odolnosti [27]

## 5.4 Experimentální simulace dlouhodobého působení vody

Experimentální měření jsou zaměřena na odolnost materiálu vůči pronikání vody. Vodní propustnost je totiž jedním z nejzávažnějších ukazatelů životnosti a trvanlivosti stavebních materiálů. Snahou bylo připravit takový experiment, který by simuloval dlouhodobé působení vlhkosti na stavbu. Ačkoli jsou sledovány schopnosti ochrany proti vlhkosti kompletně, laboratorní experimenty byly zaměřeny na extrémní podmínky při zatížení hydrostatickým tlakem, který by mohl odpovídat hloubce ponoru stavby při povodních. Proto bylo navrženo zatížení testovaného vzorku vodním sloupcem 1,5m. Získaná data z měření pojednávají o propustnosti zkoumaného materiálu pro vodu na plochém vzorku. Měření je časově závislé a ukazuje na hydrostatickou odolnost materiálu.

### 5.4.1 Zatížení hydrostatickým tlakem

Navrhovaná metodika měření odolnosti vůči pronikání vody je založena na dlouhodobém zatížení hydrostatickým tlakem. Tento tlak vzniká v kapalině a je způsoben její tíhou. Kapalina je v dané souřadné soustavě v klidu a působí na ni nenulové tíhové pole. Tíhovým polem se rozumí pole tíhové síly. Tíhová síla působí na tělesa na povrchu Země a je součtem gravitační a odstředivé síly, která vzniká otáčením Země kolem své osy. Tíhová síla  $F_g$  udílí všem tělesům na povrchu Země tíhové zrychlení  $g$ , tedy  $F_g = mg$ . Na kapalinu nacházející se v tíhovém poli Země působí tíhová síla, a proto je povrch volné kapaliny vždy kolmý k tíhové síle. Hydrostatický tlak vzniká v kapalině její tíhou  $G$ . Tíha je veličina vyjadřující sílu působící na těleso v gravitačním poli na podložku nebo závěs. Je to statický projev působící tíhové síly, a proto  $G = F_g$ . Tíha tělesa vzniká na Zemi z gravitační síly, kterou je těleso Zemí přitahováno.

Hydrostatický tlak v kapalině působí na tělesa do ní ponořená, na stěny nádoby a na vlastní části kapaliny. Což znamená, že části položené výše tlačí svou vlastní tíhou na části kapaliny položené níže. Tento tlak působí všemi směry. To je způsobenou rozkladem sil mezi částicemi kapaliny do různých směrů. [31, 32]

#### **Výpočet hydrostatického tlaku**

Hydrostatický tlak  $p_h$  [Pa] je přímo úměrný hloubce v kapalině  $h$  [m] (tj. výšce kapalinového sloupce), na hustotě kapaliny  $\rho$  [kg.m<sup>-3</sup>] a na tíhovém zrychlení  $g$  [m.s<sup>-2</sup>]. Pokud je hustota kapaliny  $\rho$ , pak bude hmotnost kapaliny v nádobě  $m = V\rho$ . A jestliže je nádoba o průřezu  $S$  a se svislými stěnami o výšce  $h$ , pak bude objem kapaliny v této nádobě  $V = Sh$ . Tíhovou sílu působící na dně nádoby lze pak zapsat následovně:

$$G = mg = Sh\rho g \quad (3)$$

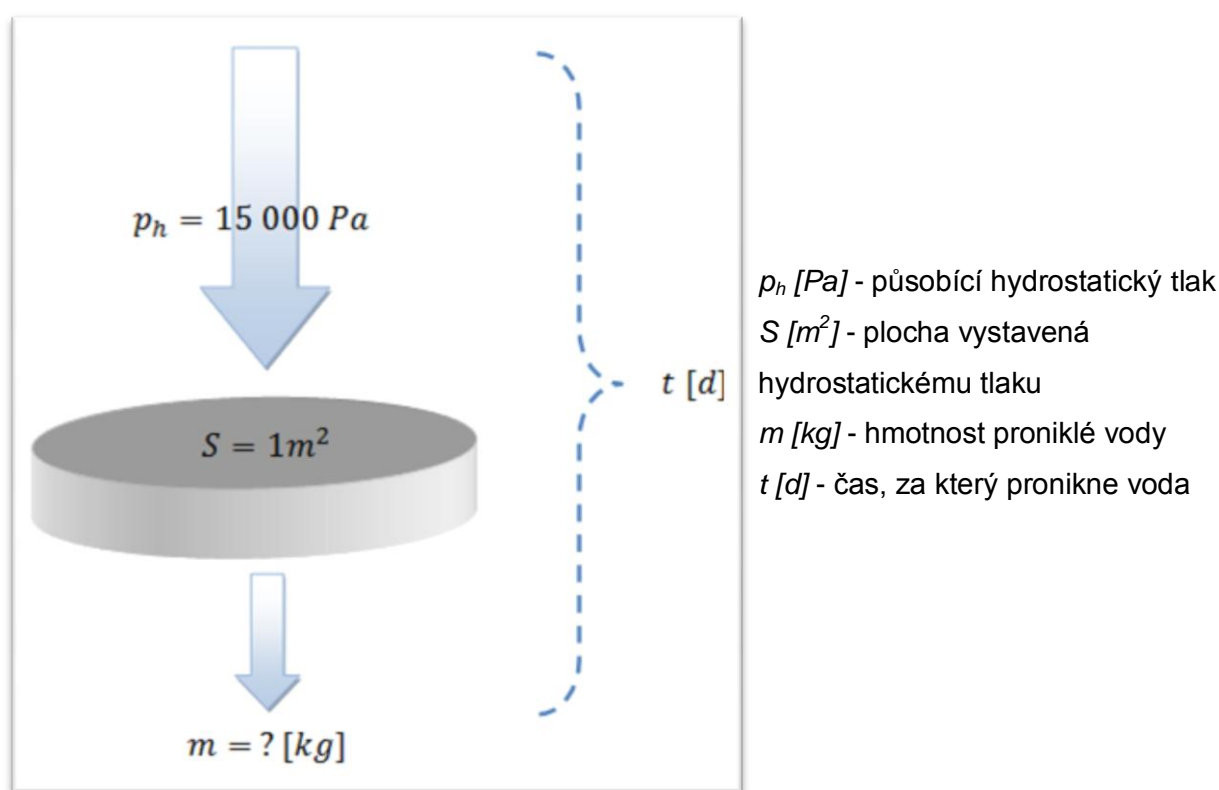
Tlak u dna nádoby vychází ze vzorce pro tlak  $p = \frac{F_g}{S} = \frac{G}{S}$ . Hydrostatický tlak v hloubce  $h$  pod hladinou kapaliny o hustotě  $\rho$  má pak následující tvar:

$$p_h = h\rho g \quad [31, 32] \quad (4)$$

#### 5.4.2 Princip zkoušky

Principem zkoušky je určit, jaké množství kapaliny pronikne vrstvou vzorku o známé ploše za určitý čas při působení daného hydrostatického tlaku. Stručný náčrt principu je uveden na obrázku 35. Jako jednotky času byly použity dny (d), které odpovídají 24 hodinám. Hydrostatický tlak zde působil ve válcové trubce o výšce 1,5 m. Působící kapalinou byla voda s přibližnou hustotou  $1\,000\,\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ . Hmotnostní přírůstek [kg] tak přibližně odpovídal objemu proniklé kapaliny [l]. Testované vzorky byly vystaveny zatížení hydrostatickým tlakem o velikosti vypočtené dle následujícího vzorce:

$$p_h = h\rho g = 1,5 \times 1\,000 \times 9,81 = 14\,715\,\text{Pa} \quad (5)$$



Obrázek 23 Schéma metodiky měření

Sledovaným parametrem je hmotnost vody, která pronikne vzorkem do testovací sklenice. Byly zaznamenávány hmotnostní přírůstky  $\Delta m$  zkušební sestavy, resp. sorbentu. Předpokladem je, že hmotnostní přírůstek je způsobený množstvím vody proniklé vzorkem. Pro každý vzorek byla vypočítána změna hmotnosti dle vztahu:

$$\Delta m = m_2 - m_1 \quad (6)$$

kde  $\Delta m$  je změna hmotnosti (hmotnostní přírůstek) v g;

$m_1$  hmotnost sestavy, resp. sorbentu v g;

$m_2$  hmotnost sestavy, resp. sorbentu v g před vystavením hydrostatickému tlaku.

Zkoušené vzorky byly vystaveny působení tlaku vody na kruhové ploše  $S$  o průměru  $d$  6 cm. Velikost testované plochy je tedy následující:

$$S = \frac{\pi d^2}{4} \doteq 28,27 \text{ [cm}^2\text{]} \quad (7)$$

Naměřené hmotnostní přírůstky způsobené průnikem vody skrz vzorek o ploše 28,27 cm<sup>2</sup> byly přepočítány na plochu 1 m<sup>2</sup>. Pro výpočet propustnosti vody [kg.m<sup>-2</sup>] byl zvolen přepočet z naměřených výsledků:

$$\text{Propustnost vody [kg.m}^{-2}\text{]} = \frac{\Delta m \text{ [kg]}}{S \text{ [m}^2\text{]}} \quad (8)$$

### 5.4.3 Návrhy experimentu

Představou od počátku bylo upevnění testovaného vzorku k reálnému vodnímu sloupci, aby bylo možné sledovat množství proniklé kapaliny skrz daný vzorek v závislosti na čase. Principiálně je tento způsob sice jednoduchý, ale praktické provedení skýtalo nemalé problémy. Problematické především bylo vodotěsné upevnění vzorku, aby voda nepronikala ve spoji a působila pouze na samotný vzorek. Problémem bylo také zajištění vhodných materiálů pro měřicí zařízení, které by byly odolné vůči vodě.

Na začátku bylo navrženo několik možností, jakým způsobem by bylo možné odolnost proti pronikání vody měřit a jak postupovat při konstrukci konkrétního zařízení. Vybrané návrhy byly realizovány a zkoušeny. Zařízení poskytující co nejpřesnější výsledky pak bylo zkonstruováno pro následující měření. Bylo na něm provedeno testování zhotovených vzorků ze sledovaného materiálu. Pro úplnost budou v této podkapitole stručně uvedeny i konstrukce zařízení, které se z důvodu nepřesnosti měření nejevily jako vhodné.

### ***Aplikace testovaného materiálu na HT trubku***

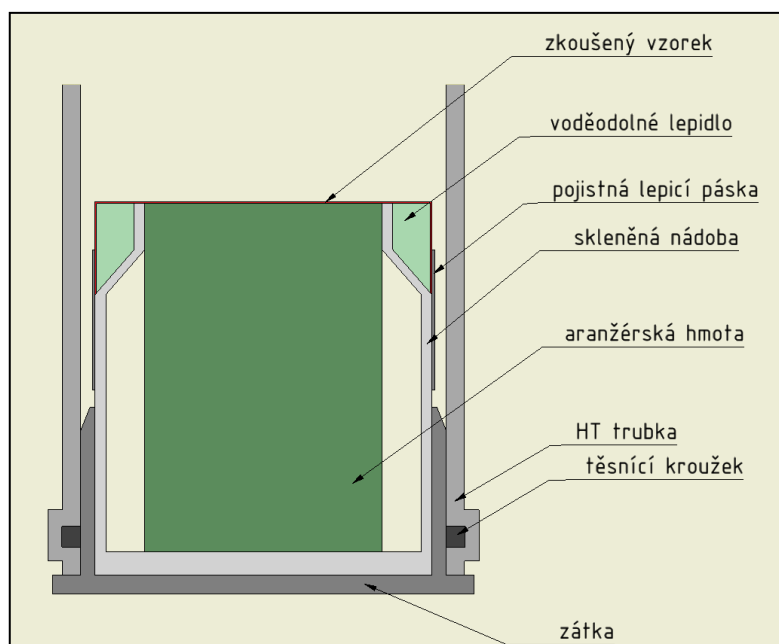
Myšlenkou bylo využití polypropylenové HT trubky, na jejíž konec byl připevněn testovaný materiál. Pro zjištění množství proniklé vody byla použita floristická aranžérská hmota, která se vyznačuje vysokou sorpcí kapaliny. Z této hmoty byl vyříznut malý váleček o výšce 5 cm a o průměru odpovídajícím rozměrům trubky. Pro upevnění vzorku bylo vyzkoušeno několik způsobů a materiálů. Ani jeden však neumožňoval dokonalé utěsnění, při kterém by voda neunikala spoji. Proto bylo od této metody upuštěno. Na obrázku 24 je znázorněna fotodokumentace postupu.



Obrázek 24 Aplikace testovaného materiálu na HT trubku

### ***Upevnění materiálu na skleněnou nádobu***

U dalšího zkonstruovaného návrhu testovacího zařízení pro měření propustnosti vody se jednalo taktéž o měření samotného textilního materiálu – nanovláknenné membrány. Návrh tohoto zařízení je uveden na obrázku 25.



Obrázek 25 Návrh testovacího zařízení

Navržená testovací metodika se skládala z následujících součástí:

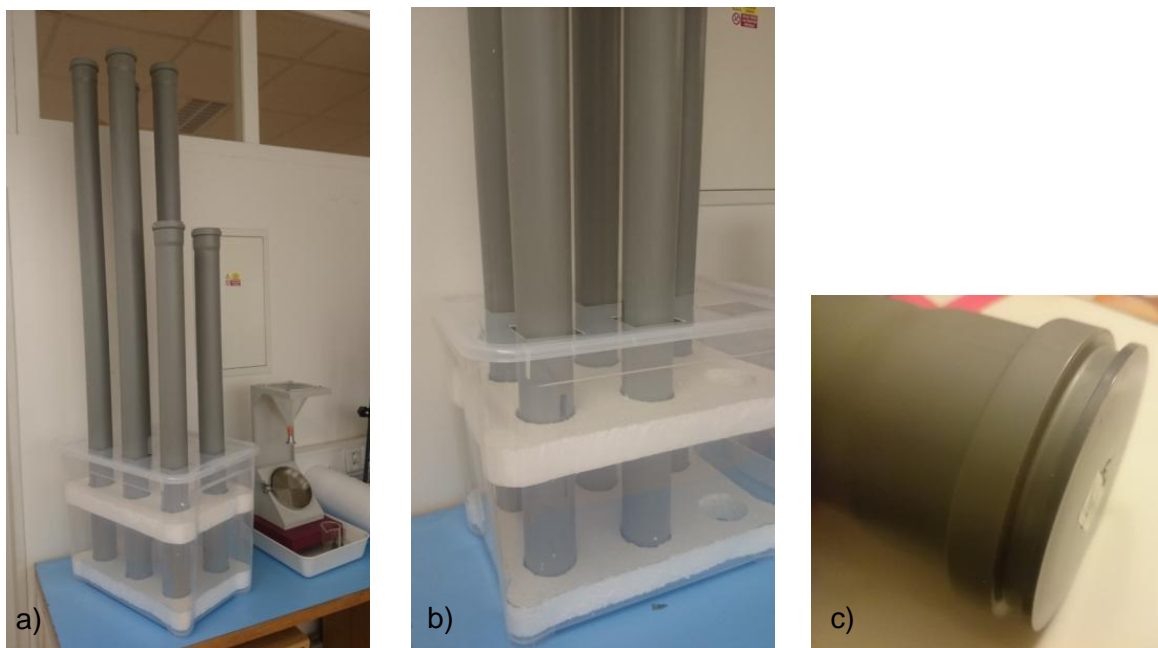
- HT trubka z polypropylenu obsahující těsnící kroužek dlouhá 1,5 m
- Zátka zajišťující vodotěsný a zároveň odnímatelný spoj
- Aranžérská hmota sloužící jako absorbent
- Skleněná nádoba pro upevnění vzorku pevně přilepená k zátce
- Lepidlo a lepicí páska pro zajištění vzorku na nádobě

Před zahájením měření bylo nejdříve potřeba připravit testovaný vzorek. Vzorky byly vystříženy do kruhového tvaru o průměru 10 cm. Po nanesení lepidla na hrdlo testovací sklenice bylo možné na něj umístit vzorek a lehce přitlačit k lepenému spoji. Použité lepidlo muselo být zvoleno tak, aby nenarušovalo texturu vzorku či jakkoli jinak ovlivňovalo jeho vlastnosti. Lepidlo zároveň muselo být odolné proti vodě. Pro zajištění krajů vzorku byla použita lepicí páska. Postup je vyobrazen na obrázku 26. Testovací sklenici, která byla pevně přilepena k zátce, byla opatrně vsunuta do HT trubky (viz obrázek 27 c)

Takto připravené zařízení se umístilo do podélné pozice kolmo k zemi. Stabilitu zajišťoval vytvořený stojan, který měl kapacitu šesti zařízení. Vyobrazen je na obrázku 27 a) a 27 b). Do trubky se nalila voda odpovídající sledovanému vodnímu sloupci. Sledovanou hodnotou byl váhový přírůstek aranžérské hmoty vzniklý proniknutím vody skrz vzorek. Alternativně by bylo možné sledovat pokles hladiny pomocí plováku či měřítka. Pro krátkodobá měření je možné zanedbat úbytek vzniklý samovolným odparem vody, nicméně u dlouhodobého pokusu je třeba ho zohlednit.



Obrázek 26 Příprava vzorku na testovací sklenici



Obrázek 27 a) Založený experiment ve stojanu; b) Detail stojanu; c) Detail trubky osazené zátkou

Během měření byly odhaleny určité problémy komplikující práci se zařízením. Hlavní nevýhodou byla nemožnost kontrolovat testovací nádobu v průběhu měření a složitá obsluha zařízení vyžadující kompletní demontáž po každém měření. Byly tedy provedeny modifikace, které jsou popsány dále.

#### 5.4.4 Navržená metodika měření

Výsledné testovací zařízení vychází z metody popsané v předchozí kapitole. Hlavním rozdílem je, že upouští od pevného spojení testovací skleněné nádoby se zátkou HT trubky. V této metodě je trubka na jednom jejím konci osazená zátkou, která již není potřeba demontovat a vytváří dno. Skleněná nádoba je opatřena měděným nebo železným závažím a je pomocí mechanismu spouštěna na dno vodou naplněné trubky. Výhodou je možnost probíhající experiment dle potřeby kontrolovat. Dále není nutná žádná složitá manipulace se zařízením.

#### ***Upevnění testovaného materiálu***

Řešenou problematikou při testování konstrukce byl způsob upevnění materiálu na testovací skleničku a zároveň způsob spouštění testovací sestavy do vody. Řešeny byly tyto způsoby:

##### 1) Vytvoření úvazu pomocí konopného provázku

Testovaná membrána byla přichycena pomocí provázku přes hrdlo skleničky, konce provázku byly prodlouženy na délku dosahující více jak výška trubek.

Konce byly opatřeny závažími. Konopný provázek poskytuje výhodu vodotěsného a zároveň šetrného spojení. Na druhou stranu je silně nasákavý, takže nebylo možné provádět průběžná vážení celé testovací sestavy. Pro ilustraci je uveden obrázek 28.



Obrázek 28 Vytvoření úvazu pomocí konopného provázku

2) Kombinace konopného provázku a vlasce

Pro snížení nasákavosti byla využita kombinace s vlascem. Samotný vzorek byl přichycen definovanou délkou – 60 cm provázku, z něhož byly vytvořeny kličky pro provlečení vlasce. Tento postup byl značně zdlouhavý a výrazné zlepšení nepřinesl.

3) Vytvoření externího výsuvného koše pro spuštění testovací sestavy do vodou naplněné trubky a upevnění vzorku pomocí:

- a) konopného provázku
- b) kombinace silikonu a provázku
- c) kombinace silikonu a hydroizolační pásky



Obrázek 29 Příprava testovací sestavy



Nejlépe se osvědčilo využití výsuvného koše pro vložení zkušební sestavy a upevnění vzorku pomocí silikonu v kombinaci s hydroizolační páskou. Zkušební sestava se skládala ze skleněné nádoby opatřené měděným závažím a sorbentem. Na tuto nádobu se upevnil testovaný vzorek výše zmíněným způsobem. Příprava vzorků je zobrazena na obrázku 29.



Obrázek 30 Spuštění zkušební sestavy do trubky

Pomocí mechanismu pak byla tato sestava spouštěna na dno vodou naplněné trubky. Pro zkušební účely této práce byl výsuvný koš vyroben z kancelářských desek. Navržená metodika slouží jako principiální návrh pro konstrukci přístroje, který by bylo potřeba ještě zdokonalit. Spouštění sestavy do trubek v průběhu experimentu ukazuje obrázek 30.

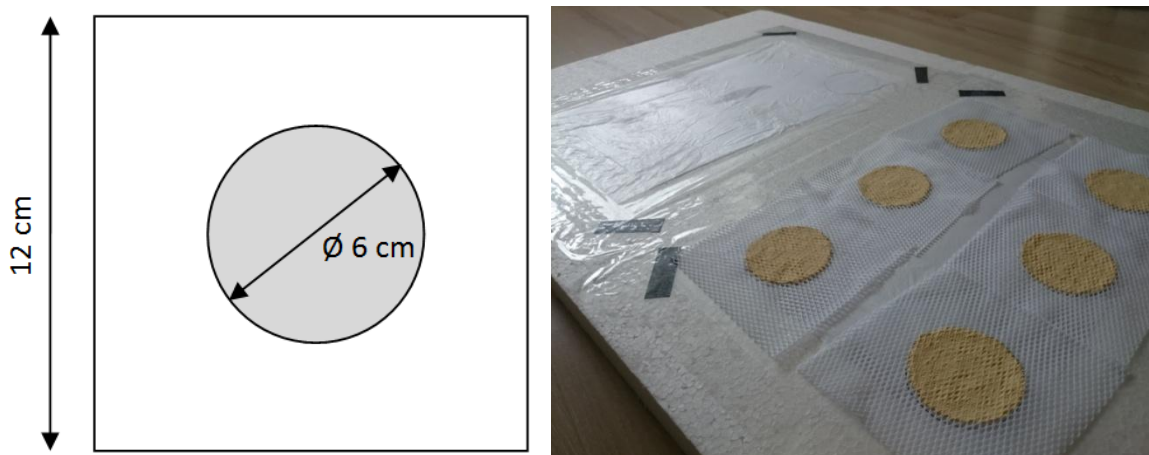
#### 5.4.5 Návrh přípravy vzorků se stavebním podkladem

Během experimentu byla otestována nejen samotná membrána, ale i kombinace se stavebním podkladem. Pro porovnání byly připraveny i vzorky stavebního materiálu bez membrány, aby bylo možné zhodnotit změnu vlastností. Navrhovaným propojením nanovlákněné membrány s fasádou dřevostavby je integrace do ještě vlhkého stavebního materiálu. Uvažovaným materiálem je stěrkový tmel využívaný pro vyrovnání nerovností povrchu. Představou je aplikace membrány (umístěné na nosné netkané textilií) na vlhký tmel po jeho vyrovnání. V okamžiku zaschnutí se nanovlákněná struktura propojí s materiálem a nosnou textilií lze odejmout. Následně jsou aplikovány další vrstvy fasády dle standardního postupu. Další možností je propojení s jednou z vrstev fasádní omítky na obdobném principu jako v případě tmele.

### **Příprava vzorků**

Byly provedeny dvě série experimentů zjišťující propustnost pro vodu u vzorků s aplikovanou nanovláknennou membránou na omítku a na stěrkový tmel. V každé sérii byly taktéž pro porovnání vzorky ve stejné skladbě, ale bez membrány. Díky dvěma navrženým způsobům začlenění membrány mezi jednotlivé fasádní vrstvy bylo možné zjistit, který způsob aplikace bude optimálnější. Otázkou také bylo, zda navržené propojení se stavebním podkladem narušuje hydroizolační schopnosti testované membrány či nikoliv.

Samotná příprava vzorků probíhala na pevné desce s nataženou mikrotenovou fólií pro lepší manipulaci. Na fólii byl naznačen kruhový tvar a velikost vzorků o průměru 6 cm. Do předkreslených tvarů byl nanesen stavební materiál. Pro vzorky obsahující nanovláknennou membránu byla tato membrána spolu s nosnou textilií nastříhána na díly o velikosti 12 x 12 cm. Takto připravené dílky byly přitisknuty k připravenému čerstvému podkladu tak, aby stavební materiál kruhového tvaru byl přibližně ve středu dílu membrány. Do kruhového tvaru pak byla nanesena následující vrstva stavebního materiálu. Pro vzorky neobsahující membránu byla místo ní použita jemná síťka z nenasákavého materiálu. Náčrt a reálná příprava vzorků je zobrazena na obrázku 31.



Obrázek 31 Příprava vzorků

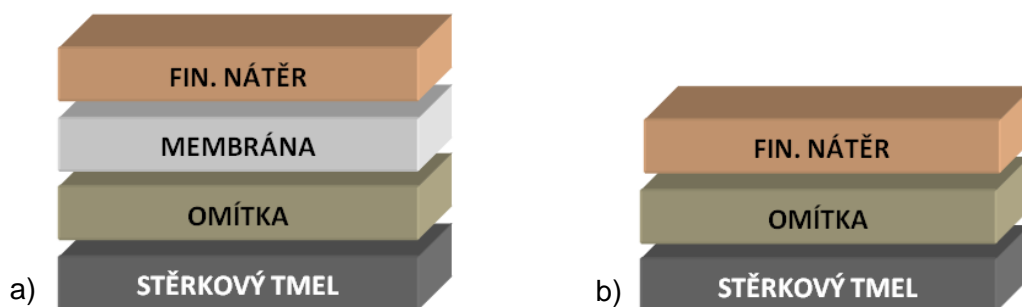
#### **Série I.**

V první sérii byla membrána (spolu s nosnou textilií) aplikována na čerstvou omítku. Po zaschnutí byla nosná textilie sejmuta a kompozit byl ještě opatřen finálním nátěrem. Složení vzorků první série bylo následující:

- Stěrková hmota weber.therm klasik (jednosložková prášková hmota na bázi cementu)

- Pastovitá omítka *weber.pas silikon* (tenkovrstvá omítka obsahující silikonovou disperzi, zrnitost 1,5 mm)
- Aplikovaná nanovláknenná membrána *Nanomembrane*
- Finální nátěr *CAPAROL AlphiSilan* (fasádní barva na bázi silikonové pryskyřice minerálního charakteru, vodoodpudivá a paropropustná úprava)

Ilustrace jednotlivých vrstev vzorků ze série I. je uvedena na obrázku 32.



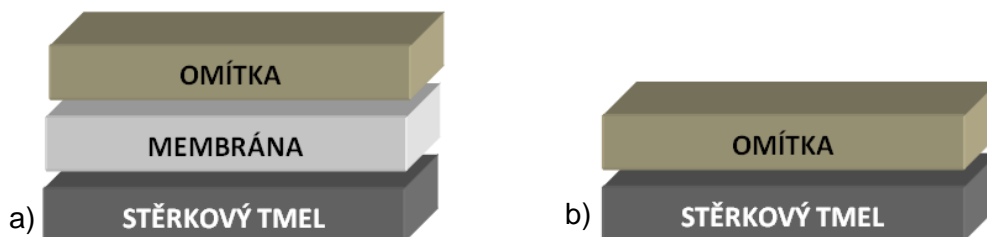
Obrázek 32 Skladba vzorků - Série I. a) včetně membrány; b) bez membrány

## Série II.

Druhá série byla vyhotovena v jednodušším provedení a to bez finálního nátěru, který není nutné použít. Nanovláknenná membrána byla v tomto případě aplikována rovnou na stěrkový tmel a dále opatřena tenkovrstvou omítkou. Skladba kompozitu byla následující:

- Stěrková hmota *weber.therm klasik* (jednosložková prášková hmota na bázi cementu)
- Aplikovaná nanovláknenná membrána *Nanomembrane*
- Pastovitá omítka *weber.pas silikon* (tenkovrstvá omítka obsahující silikonovou disperzi, zrnitost 1,5 mm)

Ilustrace jednotlivých vrstev vzorků ze série II. je uvedena na obrázku 33.



Obrázek 33 Skladba vzorků - Série II. a) včetně membrány; b) bez membrány

## 5.5 Statistické zhodnocení výsledků

Získaná data byla zhodnocena v programu STATISTICA 12 pomocí analýzy rozptylu (ANOVA) a regresní analýzy.

### **Testování hypotéz**

Při testování hypotéz se vychází z toho, že platí předpokládaná vlastnost náhodných veličin. To lze označit jako nulovou hypotézu.

Kvůli náhodnosti dat nelze provádět závěry s naprostou jistotou. Z tohoto důvodu se předem stanovuje hladina spolehlivosti  $\alpha$ , která představuje míru rizika (pravděpodobnosti), že bude zamítnuta platná nulová hypotéza  $H_0$  (chyba 1. druhu). Obvykle je hladina spolehlivosti stanovena na 0,05 nebo 0,01, přičemž nižší hladina spolehlivosti zajišťuje vyšší jistotu při zamítání nulové hypotézy, ale naopak i větší riziko přijetí neplatné nulové hypotézy (chyba 2. druhu).

Ze sledovaných dat je třeba pro testování hypotézy vypočítat tzv. testovací kritérium, jehož rozdělení podmíněné předpokládanou platností nulové hypotézy je známo. Testovací kritérium je porovnáváno s tzv. kritickou hodnotou. Pokud testovací kritérium překročí kritickou mez, je nulová hypotéza zamítnuta ve prospěch opačné tzv. alternativní hypotézy  $H_1$ .

V současné době již není potřeba hledat kritické meze v tabulkách rozdělení příslušného testovacího kritéria, protože díky využití softwarů lze vypočítat tzv. hodnotu významnosti (označovanou jako p-hodnota). Tato hodnota znamená pravděpodobnost výsledků, které ještě více svědčí proti  $H_0$ . Je to nejmenší hladina, na které zamítáme  $H_0$ , resp. největší hladina, na které  $H_0$  nezamítáme. Výhodou p-hodnoty je její nezávislost na zvolené hladině  $\alpha$  a podává informaci pro všechny hladiny zároveň. [33]

Vyhodnocení testu je prováděno dle těchto pravidel:

- $p - \text{hodnota} < \alpha$  . . . zamítáme  $H_0$  ve prospěch  $H_1$  s rizikem chyby 1. druhu s pravděpodobností nanejvýše  $\alpha$ .
- $p - \text{hodnota} \geq \alpha$  . . . nezamítáme  $H_0$  s rizikem chyby 2. druhu s pravděpodobností označovanou  $\beta$ . [33]

### **Analýza rozptylu**

Tato metoda je určena pro analyzování účinku jednoho faktoru (jednofaktorová ANOVA) nebo více faktorů (vícefaktorová ANOVA) na zkoumanou proměnou, která je přímo závislá. ANOVA testuje rozdíly průměrů mezi více testovanými skupinami. Definice nulové hypotézy  $H_0$ , kde  $m$  = počet skupin:

$$H_0: \mu_1 = \mu_2 = \dots = \mu_m$$

a definice alternativní hypotézy:

$$H_1: \mu_1 \neq \mu_2 \neq \dots \neq \mu_m$$

V případě nezamítnutí nulové hypotézy, test ukazuje na nevýznamnost rozdílů mezi testovanými skupinami. V případě zamítnutí  $H_0$  platí alternativní hypotéza  $H_1$ : ne všechny střední hodnoty jsou stejné (tj. alespoň jedna ze středních hodnoty se liší od ostatních). Alternativní hypotéza vyjadřuje určitou rozdílnost mezi skupinami – jednotlivými testovanými materiály. Při zamítnutí nulové hypotézy  $H_0$  o vlivu působícího faktoru, je nutno pomocí multikomparativních testů porovnat statistickou významnost jednotlivých rozdílů středních hodnot u všech možných párů porovnávaných skupin. Mezi nejčastěji používané testy patří např. Tukeyho test, Scheffého test, Duncanův test. [33, 34]

### **Regresní analýza**

Regresní analýza je využívána v případě, kdy je sledována závislost určité kvantitativní proměnné na jedné nebo více dalších kvantitativních proměnných. Regresní funkce vyjadřující průměrný průběh zkoumané závislosti převádí volnou závislost do tvaru matematické závislosti zapsané rovnicí, která v grafickém zobrazení tvoří „ideální osu“ korelačního pole, vypočtenou přesně definovaným algoritmem. Pomocí nejpříznivějších (nejvyšších) hodnot charakteristik korelace je možné vybrat relativně nejvhodnější regresní funkci pro průběh hodnocené závislosti. Pro vyhodnocení těsnosti závislosti se užívá koeficient determinace  $R^2$ . Pro vyjádření průměrného průběhu hodnocené závislosti mezi nejčastěji používané typy závislosti patří například:

- lineární regresní funkce  $y' = a + bx$ 
  - v případech, kdy osou korelačního pole je přibližně přímka.
- logaritmická funkce  $y' = a + b \cdot \log x$ 
  - v případech, kdy konstantní zvyšování hodnot nezávisle proměnné vyvolává zpomalený růst hodnot závisle proměnné [33, 34]

## 6. Výsledky a diskuze

### 6.1 Paropropustnost

Pomocí přístroje Permetest byla u testovaných materiálů zjištěna relativní paropropustnost textilií  $p$  [%] a výparný odpor  $R_{et}$  [ $\text{Pa}\cdot\text{m}^2\cdot\text{W}^{-1}$ ]. Získaná data jsou uvedena v tabulce 1. Testována byla nejprve nanovláknenná membrána *Nanomebrane* (dále zkráceně označována NV membr.). Jelikož je membrána z výroby dodávána na nosné netkané textilii, byly provedeny zkoušky i na dvouvrstvém materiálu – nanovláknenná membrána s netkanou textilií (dále NV membr. + NT). Pro porovnání byly provedeny testy i na pojistných hydroizolacích – mikroperforované fólii (dále MP fólie) a difúzní membráně (dále Dif. membr.) U naměřených dat byly provedeny základní statistické výpočty (tabulka 2).

Tabulka 1 Naměřená data - paropropustnost

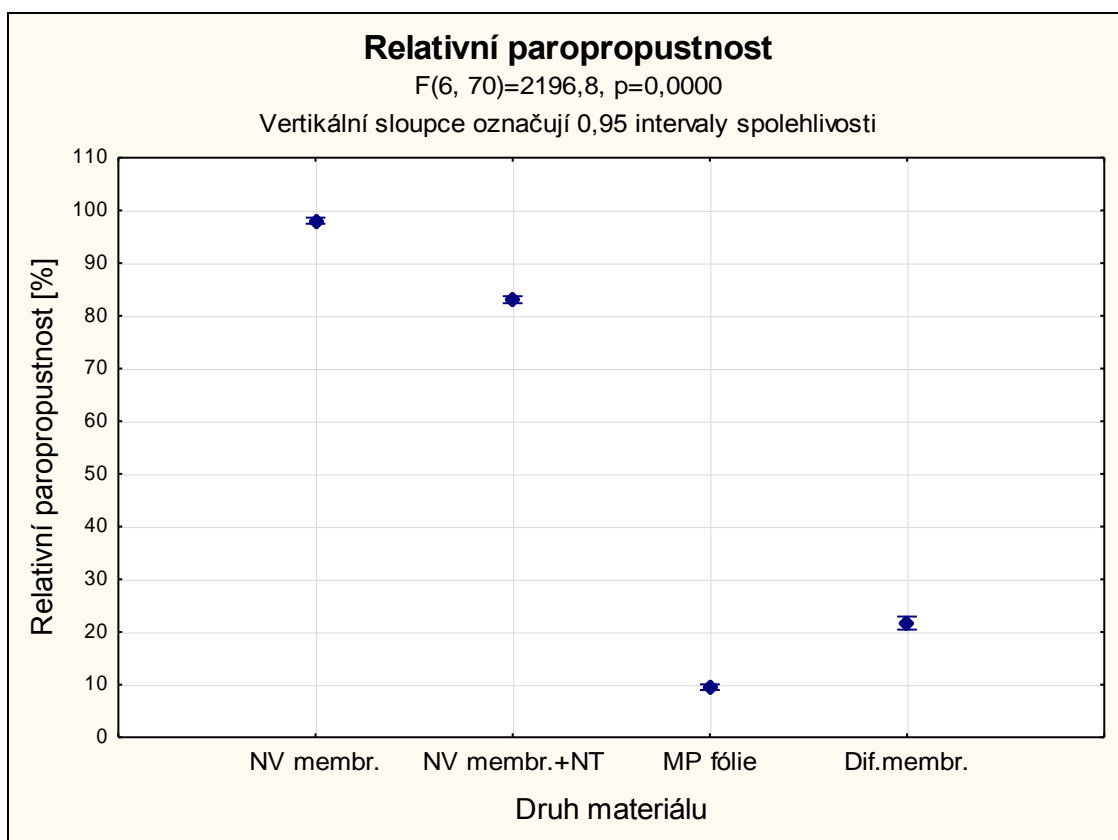
vzorek	NV membr.		NV membr. + NT		MP fólie		Dif. membr.	
	$p$ [%]	$R_{et}$ [ $\text{Pa}\cdot\text{m}^2\cdot\text{W}^{-1}$ ]	$p$ [%]	$R_{et}$ [ $\text{Pa}\cdot\text{m}^2\cdot\text{W}^{-1}$ ]	$p$ [%]	$R_{et}$ [ $\text{Pa}\cdot\text{m}^2\cdot\text{W}^{-1}$ ]	$p$ [%]	$R_{et}$ [ $\text{Pa}\cdot\text{m}^2\cdot\text{W}^{-1}$ ]
1	97,1	0,2	84,4	1,2	9,4	57,7	22,7	20,4
2	98,2	0,1	80,4	1,4	9,8	55,5	20,9	23,0
3	97,6	0,1	83,0	1,3	8,8	62,3	21,9	21,9
4	99,0	0,1	82,1	1,4	9,7	55,7	22,5	20,9
5	98,2	0,1	85,0	1,1	9,9	54,9	20,4	22,3
6	99,4	0,1	82,1	1,4				
7	99,6	0,0	84,9	1,1				
8	98,7	0,0	83,3	1,3				
9	96,5	0,1	83,5	1,2				
10	96,2	0,2	82,1	1,4				
11	98,1	0,1	82,1	1,4				
12	96,8	0,1	83,3	1,3				
13	99,2	0,0	83,60	1,2				
14	98,0	0,1	83,1	1,3				
15	98,2	0,1	83,0	1,3				

Tabulka 2 Základní statistiky – relativní paropropustnost  $p$  [%]

<b>Materiál</b>	<b>Průměr</b>	<b>Medián</b>	<b>Min.</b>	<b>Max.</b>	<b>Rozptyl</b>	<b>Směrodatná odchylka</b>	<b>Variační koeficient</b>
NV membr.	98,05	98,20	96,20	99,60	1,10	1,05	1,07
NV membr.+NT	83,06	83,10	80,40	85,00	1,45	1,20	1,45
MP fólie	9,52	9,70	8,80	9,90	0,20	0,44	4,66
Dif. membr.	21,68	21,90	20,40	22,70	1,00	1,00	4,62

### Jednofaktorová analýza variance

Vliv použitého materiálu na relativní paropropustnost byl zhodnocen jednofaktorovou analýzou rozptylu. Ve výstupu analýzy rozptylu jednoduchého třídění byla vyhodnocena statistická významnost rozdílů mezi průměrnými hodnotami relativní propustnosti u čtyř sledovaných materiálů. Již z posouzení grafu průměrných hodnot relativní paropropustnosti pro jednotlivé materiály lze usuzovat na odlišnost jednotlivých materiálů (obrázek 34). Hladina významnosti  $p = 0,0000$ . Je zamítnuta nulová hypotéza  $H_0$  ve prospěch alternativní  $H_1$ , podle které se nejméně jedna dvojice z porovnávaných průměrů statisticky liší na hladině významnosti  $\alpha = 0,05$ .



Obrázek 34 Graf průměrů s odchylkami: vliv materiálu na relativní paropropustnost (ANOVA)

Podrobnější vyhodnocení výsledků analýzy rozptylu bylo provedeno pomocí Scheffeho testu. V tabulce 3 je schematicky zobrazena statistická významnost rozdílů mezi průměry. K průměrům  $\pm$  směrodatná chyba byla přiřazena písmena, přičemž rozdílná písmena značí statisticky významné rozdíly na hladině významnosti  $\alpha = 0,05$ . Tudíž byly zjištěny statisticky významné rozdíly mezi všemi materiály.

Nejnižších hodnot dosahovala dle očekávání MP fólie, která propustila necelých 10 % vodní páry. Ani difúzní membrána nezajišťovala dostatečnou paropropustnost.



Naopak z hlediska paropropustnosti vykazovala nejlepších (nejvyšších) výsledků NV membrána. Její hodnoty se blíží k 100% paropropustnosti, což představuje tepelný tok, ke kterému by došlo odparem z volné vodní hladiny nezakryté zkoušeným vzorkem. Kombinace s netkanou textilií vykazovala statisticky průkazné zhoršení vlastností NV membrány (tabulka 3, obrázek 34).

*Tabulka 3 Vliv materiálu na relativní paropropustnost (průměr ± směrodatná chyba). Jednofaktorová ANOVA, Scheffého test, rozdílná písmena značí statisticky významné rozdíly na hladině významnosti  $\alpha = 0,05$ .*

<b>Materiál</b>	<b>Relativní paropropustnost [%]</b>	
MP fólie	9,52 ± 0,20	a
Dif. membr.	21,68 ± 0,45	b
NV membr. +NT	83,06 ± 0,31	c
NV membr.	98,05 ± 0,27	d

Pokud je paropropustnost hodnocena z pohledu klasifikace hodnot výparného odporu ( $R_{et}$ ), je paropropustnost NP fólie a difúzní membrány neuspokojivá ( $R_{et} > 20$ ), což není v souladu s deklarovanými vlastnostmi materiálů výrobcem. Naopak NV membrána samostatná i v kombinaci s netkanou textilií dosahují velmi dobré paropropustnosti ( $R_{et} < 6$ ). Průměrné hodnoty výparného odporu u sledovaných materiálů jsou uvedeny v tabulce 5, ze které jsou patrné statisticky významné rozdíly mezi materiály. Klasifikace byla provedena v souladu s ISO normou 11092 (viz tabulka 4) [27].

*Tabulka 4 Klasifikace paropropustnosti [27]*

Hodnota $R_{et}$ [Pa.m <sup>2</sup> .W <sup>-1</sup> ]	Paropropustnost
$R_{et} < 6$	Velmi dobrá
$R_{et} \leq 6 - 13$	Dobrá
$R_{et} 13 - 20$	Uspokojivá
$R_{et} > 20$	Neuspokojivá

*Tabulka 5 Vliv materiálu na výparný odpor (průměr ± směrodatná chyba). Jednofaktorová ANOVA, Scheffého test, rozdílná písmena značí statisticky významné rozdíly na hladině významnosti  $\alpha = 0,05$ .*

<b>Materiál</b>	<b>Relativní paropropustnost [%]</b>	
NV membr.	0,09 ± 0,02	a
NV membr. +NT	1,29 ± 0,03	b
Dif. membr.	21,70 ± 0,47	c
MP fólie	57,22 ± 1,35	d

## 6.2 Prodyšnost

Na přístroji FX 3300 byly testovány stejné materiály jako u paropropustnosti. Naměřené výsledky z hlediska prodyšnosti [ $\text{l.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ ] jsou uvedeny v tabulce 6. Tlakový spád byl nastaven na 200 Pa a měřená plocha byla o velikosti  $20 \text{ cm}^2$ . U naměřených dat byly taktéž provedeny základní statistické výpočty (tabulka 7).

Tabulka 6 Naměřená data - prodyšnost

Prodyšnost [ $\text{l.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ ]				
vzorek	NV membr.	NV membr. + NT	MP fólie	Dif. membr.
1	15,6	16,1	11,7	3,2
2	14,3	15,3	11,5	2,9
3	16,0	17,4	11,2	2,9
4	15,3	16,1	12,0	3,0
5	15,6	16,5	11,1	3,1
6	15,7	16,6		
7	15,4	16,1		
8	15,5	16,2		
9	15,1	16,1		
10	14,3	15,3		
11	16,1	16,8		
12	14,7	15,5		
13	16,3	16,6		
14	14,8	16,2		
15	15,6	16,2		

Tabulka 7 Základní statistiky - prodyšnost

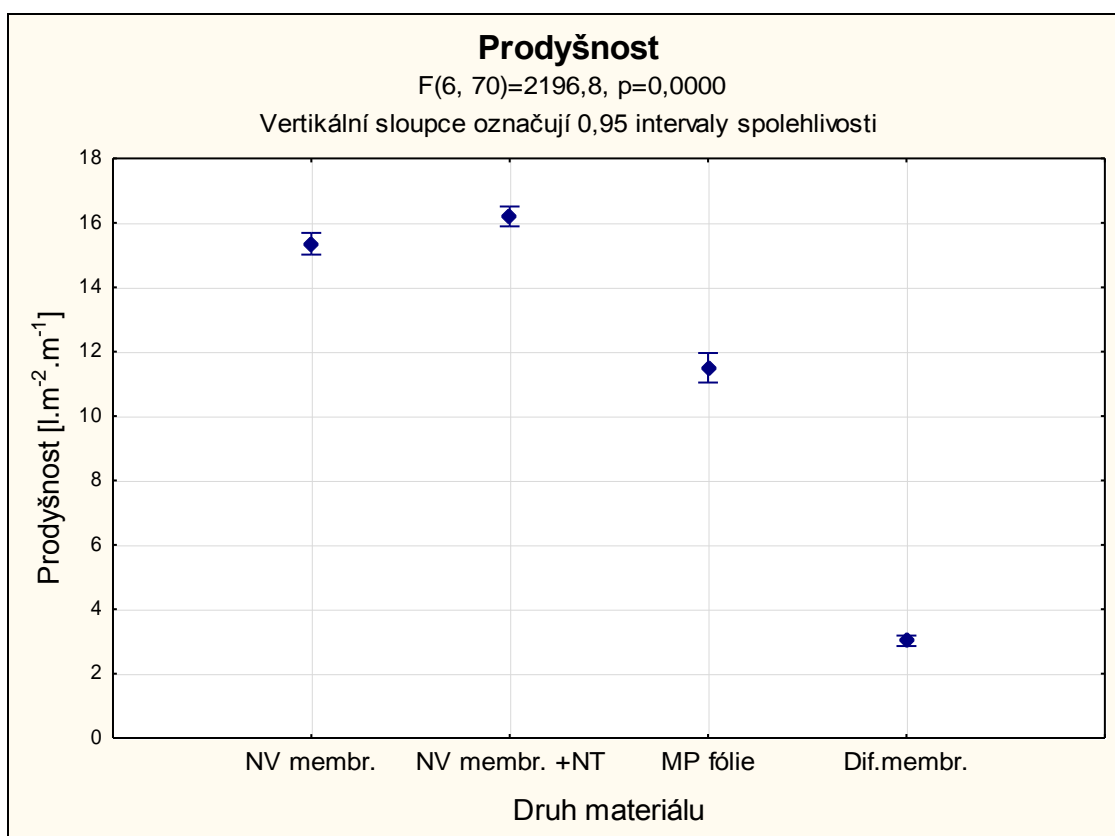
Materiál	Průměr	Medián	Min.	Max.	Rozptyl	Směrodatná odchylka	Variační koeficient
NV membr.	15,35	15,50	14,30	16,30	0,37	0,61	3,98
NV membr.+NT	16,20	16,20	15,30	17,40	0,31	0,56	3,44
MP fólie	11,50	11,50	11,10	12,00	0,14	0,37	3,19
Dif.membr.	3,02	3,00	2,90	3,20	0,02	0,13	4,32

### Jednofaktorová analýza variance

Pomocí jednofaktorové analýzy rozptylu byl zhodnocen vliv použitého materiálu na prodyšnost. Byla vyhodnocena statistická významnost rozdílů mezi průměrnými hodnotami prodyšnosti u čtyř sledovaných materiálů. Grafickým výstupem je stejně jako v předchozím případě bodový graf vyneseny z průměrných hodnot prodyšnosti. Při vizuálním porovnání hodnot v grafu je možné usuzovat odlišnost jednotlivých materiálů (obrázek 35). Hladina významnosti  $p = 0,0000$ . Je zamítnuta nulová hypotéza  $H_0$  ve

prospěch alternativní  $H_1$ , podle které se nejméně jedna dvojice z porovnávaných průměrů statisticky liší na hladině významnosti  $\alpha = 0,05$ .

Pro porovnání statistické významnosti jednotlivých rozdílů středních hodnot u všech možných párů porovnávaných skupin bylo využito Scheffého testu. Zjištěny byly statisticky významné rozdíly mezi všemi materiály. Nejnižších hodnot dosahovala difúzní membrána, která prokázala minimální prodyšnost, což může být způsobeno ochranným hydroizolačním filmem. Nejlepších hodnot prodyšnosti dosahovaly oba materiály s NV membránou. Na rozdíl od paropropustnosti došlo při kombinaci s netkanou textilií ke statisticky průkaznému zlepšení této vlastnosti. (tabulka 8, obrázek 35). To je principiálně podobné jako synergický efekt u kompozitních materiálů, kde jednotlivé složky kompozitu spolupracují a alespoň jedna jejich vlastnost je lepší než průměr vlastností jednotlivých složek. [30] V našem případě netkaná textilie s prokázanou vysokou prodyšností zlepšila celkové vlastnosti tohoto dvouvrstvého materiálu s NV membránou.



Obrázek 35 Graf průměrů s odchylkami: vliv materiálu na prodyšnost (ANOVA)

Tabulka 8 Vliv materiálu na prodyšnost (průměr ± směrodatná chyba). Jednofaktorová ANOVA, Scheffého test, rozdílná písmena značí statisticky významné rozdíly na hladině významnosti  $\alpha = 0,05$ .

<b>Materiál</b>	<b>Prodyšnost [<math>l \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}</math>]</b>	
Dif. membr.	3,02 ± 0,16	a
MP fólie	11,50 ± 0,16	b
NV membr.	15,35 ± 0,06	c
NV membr.+NT	16,20 ± 0,14	d

### 6.3 Hydrostatická odolnost

Samostatná NV membrána byla testována na přístroji Hydrostatic Head Tester M018. Během zkoušení došlo ve všech případech k předčasnému ukončení testu kvůli protržení materiálu, který nemá sám o sobě dostatečné mechanické vlastnosti. Pro účely oděvnictví je totiž NV membrána testována vždy jako dvou a vícevrstvý laminát, čímž je zajištěná pevnost výsledného materiálu. Získaná data (vodní sloupec průměrně 55 cm, tabulka 9) jsou proto nevyhovující, neodpovídají skutečné hydrostatické odolnosti NV membrány. Pro účely stavebnictví bude NV membrána použita s dalším nosným materiálem, který jí zajistí dostatečnou pevnost. Standardně využívaná metoda měření hydrostatické odolnosti je pro tyto účely nevyhovující a je potřeba hledat novou alternativu.

Tabulka 9 Hydrostatická odolnost

<b>Hydrostatická odolnost</b>	
Č. vzorku	Vodní sloupec [cm]
1	54,2
2	55,1
3	52,6
4	56,3
5	54,9
<b>Průměr</b>	54,62
<b>Rozptyl</b>	1,48
<b>Směrodatná odchylka</b>	1,22
<b>Variační koeficient</b>	2,23

## 6.4 Propustnost vody

### *Propustnost samostatné membrány*

Prvotní měření bylo zaměřeno na zjištění propustnosti pro vody u samostatné membrány a závislost této propustnosti na čase. V tabulce 10 jsou uvedeny naměřené hmotnosti  $m$  [g] celé testovací sestavy skládající se ze skleničky, závaží, sorbentu, membrány a materiálu na přichycení v průběhu sedmi dnů. Den zahájení označuje počáteční hmotnosti zkušebních sestav v g před vystavením hydrostatickému tlaku. Po následujících šest dnů byla sestava v pravidelný čas denně z vody vytažena a zaznamenána její aktuální hmotnost. Z těchto získaných dat byly vypočteny hmotnostní přírůstky  $\Delta m$  [g] dle vztahu (6), uvedeny jsou v tabulce 11. Vypočtená propustnost vody  $[kg \cdot m^{-2}]$  odpovídající hmotnosti proniklé kapaliny [kg] plochou  $1 \text{ m}^2$  dle vztahu (8) je pak zaznamenána v tabulce 12.

*Tabulka 10 Naměřená data při měření propustnosti membrány pro vodu*

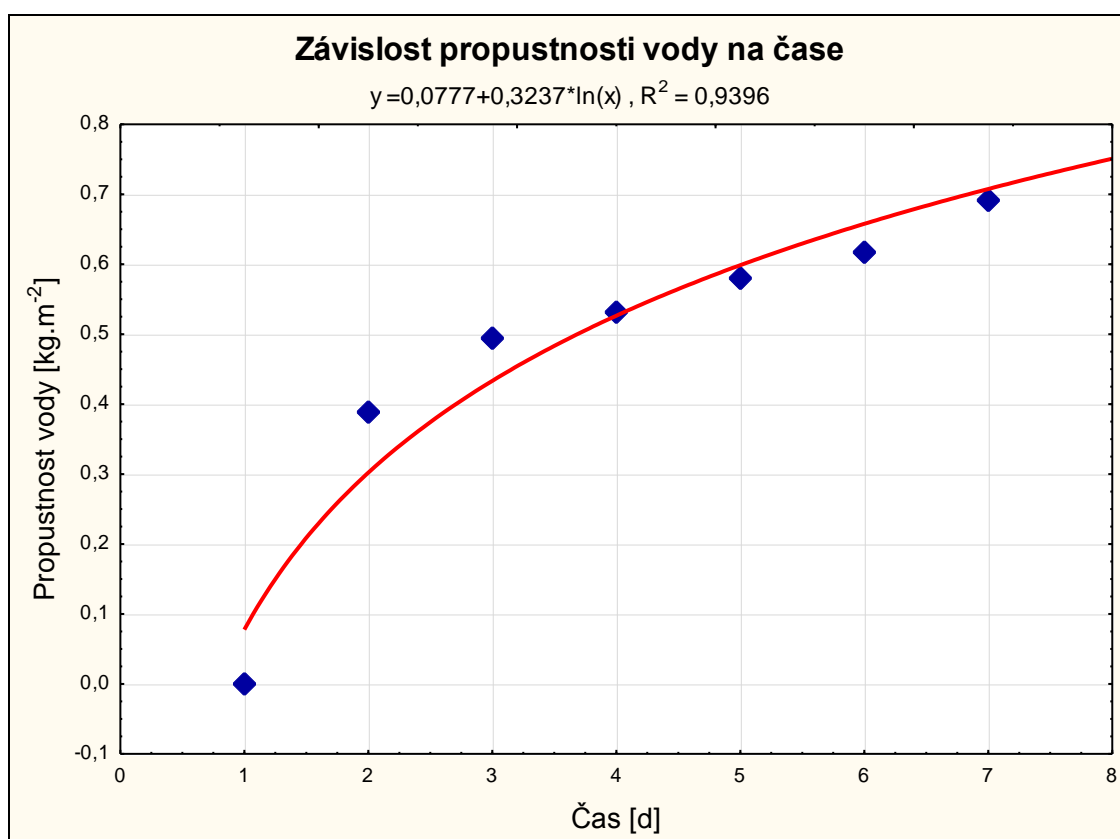
vzorek	Hmotnost zkušební sestavy [g]						
	Zahájení	Den 1	Den 2	Den 3	Den 4	Den 5	Den 6
1	584,53	585,95	586,25	586,35	586,43	586,46	586,72
2	584,41	586,01	586,31	586,41	586,55	586,69	586,88
3	584,61	585,66	585,96	586,06	586,35	586,45	586,82
4	566,14	567,15	567,45	567,55	567,72	567,89	567,92
5	569,86	570,57	570,87	570,97	571,12	571,28	571,61
6	579,20	580,01	580,31	580,41	580,43	580,46	580,52

*Tabulka 11 Hmotnostní přírůstky testovací sestavy při měření propustnosti membrány pro vodu*

vzorek	Hmotnostní přírůstky $\Delta m$ [g]					
	za 1 den	za 2 dny	za 3 dny	za 4 dny	za 5 dní	za 6 dní
1	1,42	1,72	1,82	1,90	1,93	2,19
2	1,60	1,90	2,00	2,14	2,28	2,47
3	1,05	1,35	1,45	1,74	1,84	2,21
4	1,01	1,31	1,41	1,58	1,75	1,78
5	0,71	1,01	1,11	1,26	1,42	1,75
6	0,81	1,11	1,21	1,23	1,26	1,32
průměr	1,10	1,40	1,50	1,64	1,75	1,95

Tabulka 12 Vypočtená propustnost membrány vodu

vzorek	Propustnost vody [kg.m <sup>-2</sup> ]					
	za 1 den	za 2 dny	za 3 dny	za 4 dny	za 5 dní	za 6 dní
1	0,50	0,61	0,64	0,67	0,68	0,77
2	0,57	0,67	0,71	0,76	0,81	0,87
3	0,37	0,48	0,51	0,62	0,65	0,78
4	0,36	0,46	0,50	0,56	0,62	0,63
5	0,25	0,36	0,39	0,45	0,50	0,62
6	0,29	0,39	0,43	0,44	0,45	0,47
průměr	0,39	0,50	0,53	0,58	0,62	0,69



Obrázek 36 Graf: Propustnost membrány pro vodu v závislosti na čase

### Regresní analýza

Při regresní analýze bylo využito grafické analýzy pomocí bodového grafu. Graf na obrázku 36 ukazuje průměrnou propustnost kapaliny [kg.m<sup>-2</sup>] v průběhu šesti dní. Jako počátek je zvolen bod se souřadnicemi (1; 0) vyjadřující nulový přírůstek v době před zahájením pokusu. V tomto grafu bylo využito možnosti proložení korelačního pole příslušnou regresní funkcí. Díky tomu bylo možné vizuálně posoudit proložení korelačního pole několika základními typy regresních funkcí (včetně jejich rovnic

v horní části grafu). Jako nejvhodnější regresní funkce pro průběh hodnocené závislosti byla vybrána logaritmická funkce. Body byly proloženy logaritmickou křivkou. Vzhledem k vysoké hodnotě korelačního koeficientu determinace  $R^2$  lze hovořit o velmi silné závislosti.

### ***Propustnost membrány se stavebním podkladem***

Na propustnost pro vodu byly kromě samostatné membrány proměřeny také vzorky se stavebním podkladem. Skladba vzorků odpovídala vyhotovení popsaném v předchozí kapitole 7.6 *Návrh přípravy vzorků se stavebním podkladem*. Vzorky byly vyhotoveny po šesti kusech od každého druhu. Kapacita měřicího zařízení byla omezena právě na šest současně probíhajících měření, tudíž byly provedeny čtyři po sobě jdoucí experimenty. Testovány byly vzorky:

Série I.    a) včetně membrány  
              b) bez membrány

Série II.    a) včetně membrány  
              b) bez membrány

Následující tabulky 14 - 17 obsahují naměřené hmotnosti sorbentu šesti vzorků před  $m_1$  [g] a po  $m_2$  [g] vystavení hydrostatickému tlaku po dobu šesti dní a vypočtený hmotnostní přírůstek  $\Delta m$  [g] za tuto dobu. Dále je vypočítána propustnost vody [ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$ ] odpovídající hmotnosti proniklé kapaliny [kg] plochou  $1 \text{ m}^2$ . Pro zjištění hodnoty propustnosti vody byly vypočteny základní statistické charakteristiky (tabulka 17).

### ***Série I.***

*Tabulka 13 Naměřené hmotnosti sorbentu před a po vystavení hydrostatickému tlaku po dobu 6 dní, hmotnostní přírůstky a propustnost vody pro vzorky ze Série I. včetně membrány*

<b>Série I. včetně membrány</b>				
vzorek	$m_1$ [g]	$m_2$ [g]	$\Delta m$ [g]	Propustnost vody [ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$ ]
1	1,83	8,87	7,04	2,49
2	1,81	9,63	7,82	2,77
3	1,67	6,36	4,69	1,66
4	1,72	8,73	7,01	2,48
5	1,74	9,92	8,18	2,89
6	1,71	7,89	6,18	2,19
průměr			6,82	2,41



Tabulka 14 Naměřené hmotnosti sorbentu před a po vystavení hydrostatickému tlaku po dobu 6 dní, hmotnostní přírůstky a propustnost vody pro vzorky ze Série I. bez membrány

Série I. bez membrány				
vzorek	$m_1$ [g]	$m_2$ [g]	$\Delta m$ [g]	Propustnost vody [kg.m <sup>-2</sup> ]
1	1,83	23,37	21,54	7,62
2	2,04	24,57	22,53	7,97
3	1,84	23,77	21,93	7,76
4	1,66	25,8	24,14	8,54
5	1,74	28,4	26,66	9,43
6	1,65	28,14	26,49	9,37
průměr			23,88	8,45

## Série II.

Tabulka 15 Naměřené hmotnosti sorbentu před a po vystavení hydrostatickému tlaku po dobu 6 dní, hmotnostní přírůstky a propustnost vody pro vzorky ze Série II. včetně membrány

Série II. včetně membrány				
vzorek	$m_1$ [g]	$m_2$ [g]	$\Delta m$ [g]	Propustnost vody [kg.m <sup>-2</sup> ]
1	1,9	7,42	5,52	1,95
2	1,9	7,46	5,56	1,97
3	2,12	7,03	4,91	1,74
4	2,12	7,76	5,64	1,99
5	1,92	7,64	5,72	2,02
6	1,94	7,65	5,71	2,02
průměr			5,51	1,95

Tabulka 16 Naměřené hmotnosti sorbentu před a po vystavení hydrostatickému tlaku po dobu 6 dní, hmotnostní přírůstky a propustnost vody pro vzorky ze Série II. bez membrány

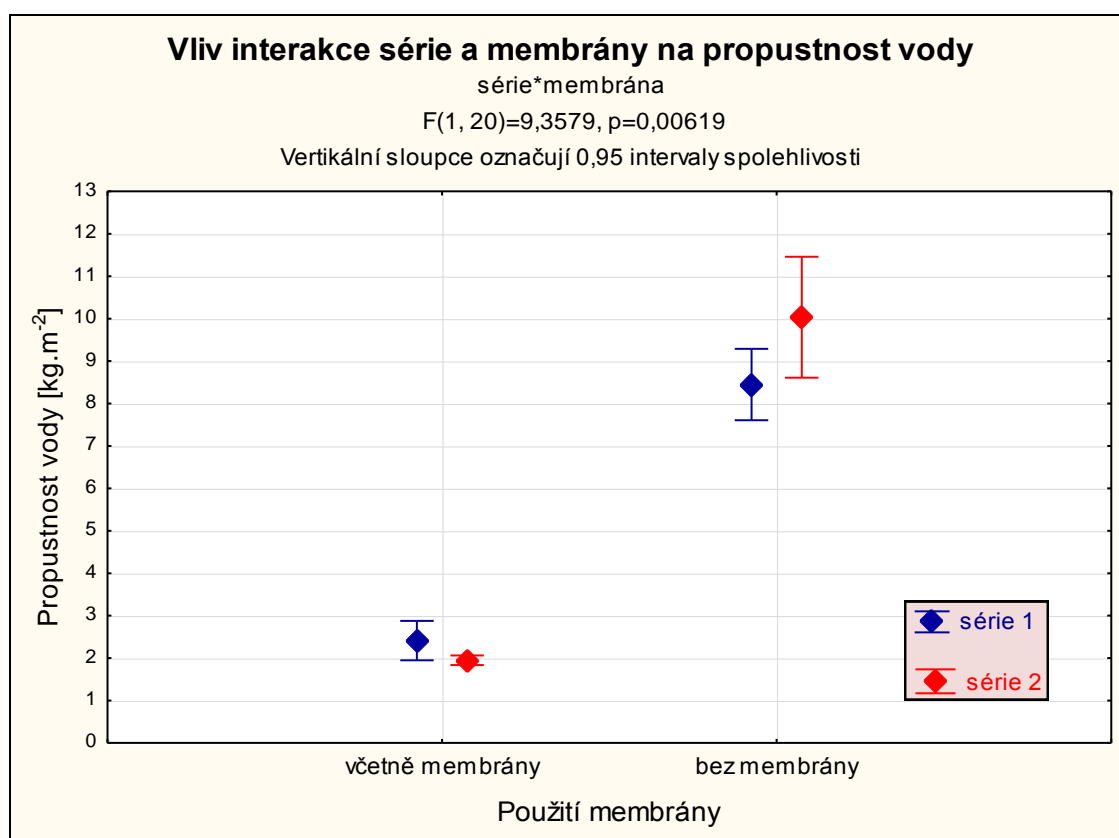
Série II. bez membrány				
vzorek	$m_1$ [g]	$m_2$ [g]	$\Delta m$ [g]	Propustnost vody [kg.m <sup>-2</sup> ]
1	1,77	28,38	26,61	9,41
2	2,01	29,68	27,67	9,79
3	1,79	25,23	23,44	8,29
4	1,59	35,73	34,14	12,07
5	1,61	28,42	26,81	9,48
6	1,59	33,13	31,54	11,15
průměr			28,37	10,03

Tabulka 17 Základní statistiky – propustnost [ $\text{kg.m}^{-2}$ ]

Série	Použití membr.	Průměr	Medián	Min.	Max.	Rozptyl	Směrodat. odchylka	Variační koef.
1	NE	8,45	8,25	7,62	9,43	0,64	0,80	9,49
2	NE	10,03	9,63	8,92	12,07	1,84	1,36	13,53
1	ANO	2,41	2,48	1,66	2,89	0,20	0,44	18,41
2	ANO	1,95	1,98	1,74	2,02	0,01	0,11	5,53

### Vícefaktorová analýza variance

Jelikož je v experimentu hodnocen vliv dvou faktorů (1 - použití membrány, 2 – série) ovlivňující výsledný znak – propustnost vody, bylo nutné pro vyhodnocení použít analýzu rozptylu dvojného třídění, ve které je současně hodnocen vliv použití membrány na propustnost vody i vliv série na propustnost vody. Vliv interakce série a membrány je graficky znázorněn na obrázku 37, kde vertikální sloupce označují 95% intervaly spolehlivosti.



Obrázek 37 Graf průměrů s odchylkami: vliv interakce série a membrány na propustnost

V obou sériích byla přijata alternativní hypotéza  $H_1$  – byl prokázán statisticky významný vliv použití membrány na propustnost ( $p < 0,05$ ). Při použití membrány

došlo k významnému snížení propustnosti vody stavebního materiálu, a to u série I. o  $6,04 \text{ kg.m}^{-2}$  a u série II. dokonce o  $8,08 \text{ kg.m}^{-2}$ .

Z podrobnějšího vyhodnocení analýzy rozptylu Tukeyho metodou (tabulka 18) byl zjištěn statisticky významný rozdíl mezi sériemi u varianty bez membrány – statisticky významně lepší vlastnosti vykazovalo uspořádání v sérii 1 v porovnání s 2. sérií. Naopak nebyl zjištěn statisticky významný rozdíl mezi sériemi u varianty s membránou. To znamená, že u varianty bez membrány finální nátěr zlepšil vlastnosti, ale na vlastnosti varianty s membránou neměl významný vliv. Ačkoli se jednotlivé série s membránou lišily způsobem začlenění membrány mezi jednotlivé fasádní vrstvy, nebyl mezi nimi potvrzen významný rozdíl.

*Tabulka 18 Vliv interakce série a membrány na propustnost (průměr ± směrodatná chyba), rozdílná písmena značí statisticky významné rozdíly na hladině významnosti  $\alpha = 0,05$  (Tukey HSD test)*

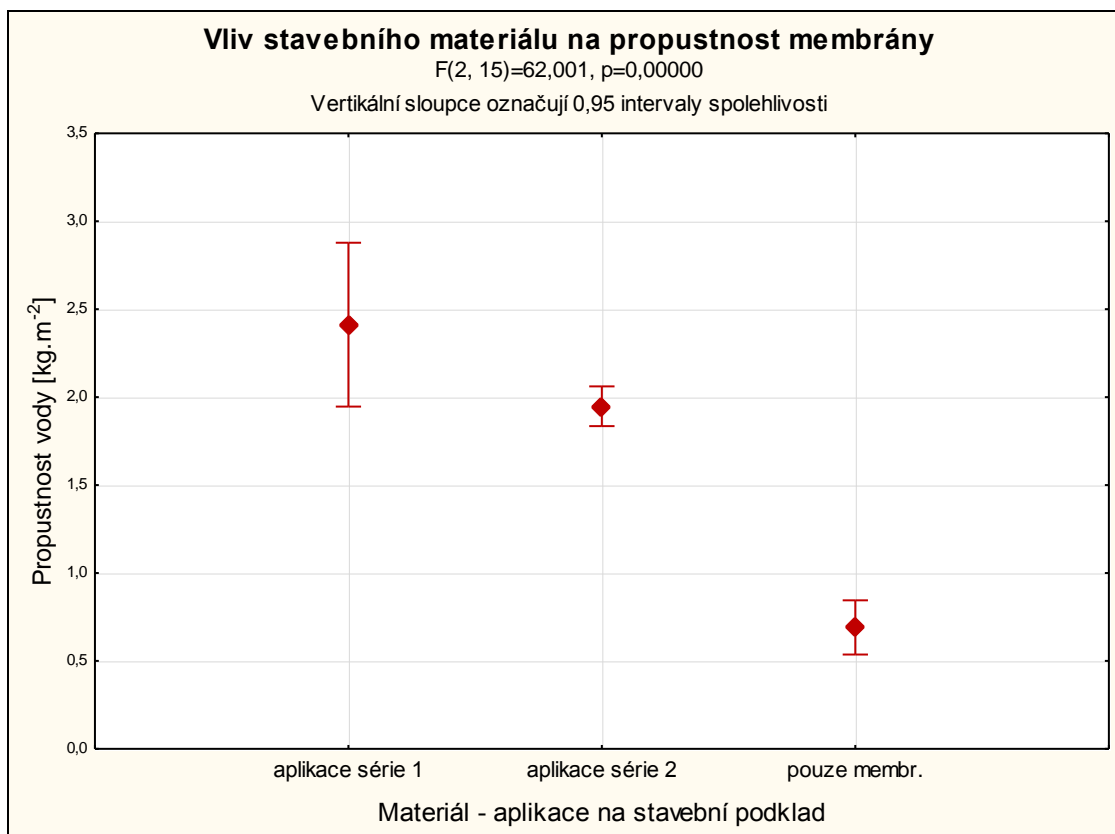
<b>Série</b>	<b>Použití membrány</b>	<b>Propustnost vody [<math>\text{kg.m}^{-2}</math>]</b>	
2	ANO	$1,95 \pm 0,04$	a
1	ANO	$2,41 \pm 0,18$	a
1	NE	$8,45 \pm 0,33$	b
2	NE	$10,03 \pm 0,55$	c

### **Jednofaktorová analýza variance**

Na závěr bylo vyhodnoceno srovnání hydroizolačních vlastností samostatné membrány a membrány se stavebním podkladem v obou sériích. Na základě jednofaktorové analýzy rozptylu byly zjištěny signifikantní rozdíly mezi všemi variantami (tabulka 19, obrázek 38).

*Tabulka 19 Vliv materiálu (samostatná membrána a její aplikace na stavební podklad) na propustnost (průměr ± směrodatná chyba), rozdílná písmena značí statisticky významné rozdíly na hladině významnosti  $\alpha = 0,05$  (Tukey HSD test)*

<b>Materiál</b>	<b>Propustnost vody [<math>\text{kg.m}^{-2}</math>]</b>	
Samostatná membrána	$0,69 \pm 0,06$	a
Membr. + aplikace série II.	$1,95 \pm 0,04$	b
Membr. + aplikace série I.	$2,41 \pm 0,18$	c



Obrázek 38 Graf průměrů s odchylkami: vliv stavebního materiálu na propustnost membrány

Vlivem aplikace membrány na stavební podklad došlo k významnému zhoršení (zvýšení) propustnosti membrány pro vodu, a to u série I. o  $1,72 \text{ kg.m}^{-2}$  a u série II. o  $1,26 \text{ kg.m}^{-2}$ . Přestože propojení se stavebním podkladem narušilo hydroizolační schopnosti testované membrány, tak významně zlepšilo vlastnosti stavebního materiálu (viz obrázek 37).

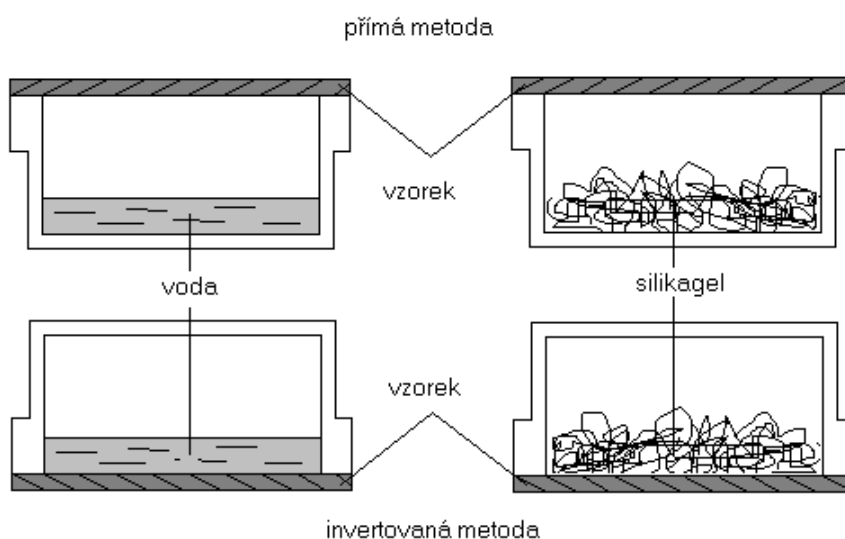
## 6.5 Předmět dalšího výzkumu

### *Testování paropropustnosti*

Samotná membrána byla již otestována z hlediska paropropustnosti na přístroji Permetest. Toto měření bylo již uvedeno v kapitole 5.1. Přístroj Permetest je ale především určen pro textilie, a tak je potřeba využít metodu, která bude vhodná jak pro textilní tak i stavební materiál. Jako vhodná se jeví gravimetrická metoda. Její nevýhodou je sice nižší přesnost, ale umožňuje měřit téměř jakýkoli materiál. Pro textilie se řídí dle normy ČSN EN 80 0855 a v případě stavebních materiálů a výrobků dle ČSN EN ISO 12572.

V principu se jedná o upevnění kruhového vzorku na misku obsahující vysoušedlo (suchá miska) nebo nasycený vodný roztok (mokrá miska). Takto připravená miska se zváží před expozicí v klimatizační komoře s řízenou teplotou a vlhkostí vzduchu. Z důvodu rozdílného tlaku vodní páry mezi prostorem zkušební misky a komorou začne vodní pára proudit skrz propustné vzorky. Pravidelným vážením soustavy lze stanovit prostup vodní páry v ustáleném stavu. [28]

Obrázek 39 znázorňuje mokrou i suchou misku v přímém a obráceném režimu.



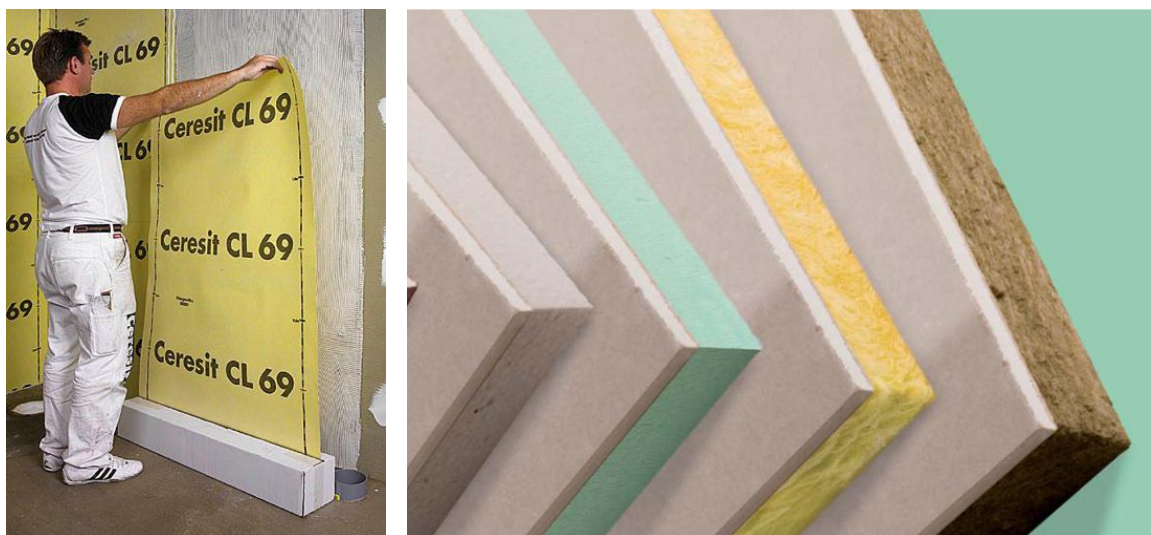
Obrázek 39 Gravimetrická metoda [28]

### *Simulace reálných podmínek*

Dalším postupem při výzkumu se uvažuje o simulaci reálných podmínek na zmenšeném modelu stavby. Tento model by simuloval reálné chování stavby. Simulováno by bylo vlhké podloží stavby, chování budovy zatopené povodní aj.

### ***Technologický postup výroby***

Navrhovány jsou dvě cesty technologického postupu výroby. V první řadě by se jednalo o aplikaci na principu tapet, jak se již osvědčilo u hydroizolačních pásů, které byly popsány v kapitole 2.2. Druhou možností by byla předvýroba tzv. prefabrikátů. Jednalo by se o kompletní aplikaci ochranné membrány na desku, principiálně jako v případě sádkartonu. Inspirace pro technologický postup výroby je na obrázku 40.



Obrázek 40 Inspirace pro technologický postup výroby [17]

## Závěr

Jako možné řešení ochrany proti vlhkosti staveb jsem navrhla použití nanovlákné membrány. U tohoto materiálu jsem předpokládala nejen vysokou hydrostatickou odolnost, ale i velmi dobré hodnoty z hlediska paropropustnosti a prodyšnosti. Tyto vlastnosti jsou při řešení vhodné ochrany dřevostaveb důležité vzhledem k problematice difúze vodních par z interiéru budovy. Paropropustnost a prodyšnost jsem proto nejprve ověřila v laboratorních podmínkách. Využila jsem přístroj Permetest, který měří relativní paropropustnost textilií a zařízení FX 3300 pro zjištění prodyšnosti. Stejným způsobem jsem otestovala i dva další materiály, které se ve stavebnictví jako bariéra proti vlhkosti využívají a zároveň u nich výrobce deklaruje dobré paropropustní schopnosti. Při porovnání všech materiálů vykazovala nanovlákná membrána statisticky významně nejvyšší hodnoty z hlediska paropropustnosti i prodyšnosti.

Pro měření průniku vlhkosti jsem připravila experiment, který simuloval dlouhodobé působení vlhkosti na stavbu. Díky navržené metodice měření propustnosti vody bylo možné porovnat chování stavebního podkladu při použití nanovlákné membrány a bez ní. Měření bylo založeno na dlouhodobém vystavení připraveného vzorku vodnímu sloupci. Principem zkoušky bylo určit, jaké množství kapaliny pronikne vrstvou vzorku o známé ploše za určitý čas při působení daného hydrostatického tlaku. Sledovaným parametrem byla hmotnost vody, která pronikne vzorkem, zjištěná pomocí hmotnostních přírůstků.

Pro aplikaci nanovlákné membrány na povrch dřevostaveb jsem zvolila začlenění membrány mezi jednotlivé fasádní vrstvy. Jako metodiku přípravy zkušebních vzorků membrány se stavebním podkladem jsem navrhla aplikaci na čerstvý stavební podklad, čímž se nanovlákná vrstva zafixovala a zůstala integrovaná v hydratovaném materiálu. Další fasádní vrstvy jsem následně aplikovala dle standardního postupu. Připravila jsem dvě série vzorků s rozdílným umístěním membrány mezi stavební vrstvy fasády – nanovlákná membrána aplikovaná na omítku a na stěrkový tmel. V každé sérii byly taktéž pro porovnání vzorky ve stejné skladbě, ale bez membrány. Připravené vzorky byly vystaveny dlouhodobému účinku působení vody.

Sledováno bylo, zda navržené propojení se stavebním podkladem narušuje hydroizolační schopnosti testované membrány či nikoliv. Statistické zhodnocení prokázalo, že vlivem aplikace membrány na stavební podklad došlo k významnému zhoršení její propustnosti pro vodu. Membrána aplikovaná na omítku vykazovala vyšší propustnost o  $1,72 \text{ kg.m}^{-2}$  a membrána aplikovaná na stěrkový tmel o  $1,26 \text{ kg.m}^{-2}$ .



Přestože propojení se stavebním podkladem hydroizolační schopnosti testované membrány narušilo, bylo prokázáno signifikantní zlepšení bariérových vlastností stavebního materiálu při použití membrány. Došlo ke snížení propustnosti vody stavebního materiálu u série I. o  $6,04 \text{ kg.m}^{-2}$  a u série II. dokonce o  $8,08 \text{ kg.m}^{-2}$  oproti stavebnímu materiálu bez aplikované membrány. Dále byla zjištěna logaritmická závislost propustnosti vody na čase. Díky dvěma navrženým způsobům začlenění membrány mezi jednotlivé fasádní vrstvy bylo také zjišťováno, který způsob aplikace bude optimálnější. Statistické šetření však významné rozdíly nezaznamenalo.

Provedenými experimenty bylo zjištěno, že díky aplikaci nanovlákněné membrány mezi jednotlivé fasádní vrstvy dochází k výraznému snížení vodní propustnosti fasády. To vede k závěru, že membrána jako bariéra proti vlhkosti působí a lze tedy uvažovat o jejím použití ve stavebnictví za tímto účelem.

## Literatura

- [1] KRŇANSKÝ, Jan. Nanotextilie pro stavebnictví. In: *TecniCall: čtvrtletník Českého vysokého učení technického v Praze*. Praha: Rektorát ČVUT, 2008, s. 13.
- [2] KRŇANSKÝ, Jan. *Perspektivy využití nanotextilií na bázi polymerů ve stavebnictví: Prospects of using polymer based nanotextiles in building industry*. V Praze: České vysoké učení technické, 2009, 26 s. ISBN 978-80-01-04273-1.
- [3] DEMO, Pavel, Šárka HOŠKOVÁ, Marina DAVYDOVA, Petra TICHÁ, Alexej SVESHNIKOV, Jan KRŇANSKÝ a Zdeněk KOŽÍŠEK. Nucleation on Polymer Nanofibers and their Controllable Conversion to Protective Layers: Preliminary Theoretical Study. *Key Engineering Materials*. 2011, 466, 201-205. DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.466.201. ISSN 1662-9795. Dostupné také z: <http://www.scientific.net/KEM.466.201>.
- [4] DEMO, Pavel, Alexej SVESHNIKOV a Zdeněk KOŽÍŠEK. Nucleation on Polymer Nanotextile: Preliminary Study. *16th International Conference on Composite Structures* [online]. 2011 [cit. 2016-04-23]. Dostupné z: <http://paginas.fe.up.pt/~iccs16/CD/721-760/721sveshnikov.pdf>.
- [5] JIRSÁK, Oldřich a kol. *Výroba a vlastnosti nanovláken* [online]. In: . [cit. 2016-01-04]. Dostupné z: <https://skripta.ft.tul.cz/databaze/data/2007-11-21/12-12-08.pdf>.
- [6] KUŽELOVÁ KOŠŤÁKOVÁ, Eva. *Textilní nanomateriály: 1. přednáška* [online]. In: . [cit. 2016-01-03]. Dostupné z: <https://nanoed.tul.cz/course/view.php?id=22>.
- [7] DEMO, Pavel, Jan KRŇANSKÝ a Alexej SVESHNIKOV. Nanotechnologie ve stavebnictví 21. století: změna paradigmatu? *Stavebnictví*. Brno: EXPO DATA spol. s r.o., 2012, 6, 26-28. ISSN 1802-2030.
- [8] BURDA, Jan. Host Studia Leonardo: odborník na nové stavební materiály prof. Pavel Demo. In: *Český rozhlas: Pořad stanice ČRo Plus* [online]. 2014 [cit. 2016-04-23]. Dostupné z: [http://www.rozhlas.cz/leonardo/dnes/\\_zprava/host-studia-leonardo-odbornik-na-nove-stavebni-materialy-prof-pavel-demo--1311666](http://www.rozhlas.cz/leonardo/dnes/_zprava/host-studia-leonardo-odbornik-na-nove-stavebni-materialy-prof-pavel-demo--1311666).
- [9] RŮŽIČKOVÁ, Jana. *Elektrostatické zvlákňování nanovláken*. Vyd. 2., nezměn. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2006, 54 s. ISBN 80-737-2066-3.
- [10] HLAVÁČ, Richard, Jiří SOUČEK, Petra TICHÁ a Tereza BENDOVIÁ. Propustnost pro vodní páru u povrchových úprav dřeva na bázi nanotechnologií. *TBZ-info* [online]. 2014 [cit. 2016-04-23]. ISSN 1801-4399. Dostupné z: <http://www.tzb-info.cz/12129-propustnost-povrchovych-uprav-drevenych-konstrukci-pro-vodni-pary>.

- [11] HLAVÁČ, Richard, Jiří SOUČEK a Petra TICHÁ. Povrchové úpravy dřevěných konstrukcí nanotextiliemi s ohledem na propustnost dřeva pro vodní páry. In: *Dřevo&Stavby: PROFIspeciál*. Praha: PRO VOBIS, s.r.o., 2014, s. 43-45. ISBN 978-80-905322-6-7.
- [12] ČSN EN ISO 12572. *Tepelně vlhkostní chování stavebních materiálů a výrobků: Stanovení prostupu vodní páry*. 2002.
- [13] DUNAJSKÁ, Jana. Zhodnocení současných možností konsolidace vápenných omítek konsolidanty na bázi hydroxidu vápenatého. *Bakalářská práce*. Pardubice : Univerzita Pardubice, 2009.
- [14] IBZ [online]. [cit. 2015-05-05]. Dostupné z <http://www.ibz-freiberg.de/>
- [15] ŠMIDTOVÁ, Markéta a Klára KROFROVÁ: Možnosti využití nanotextilií při restaurování a konzervování omítek. *Sborník konference NANS2014*. 2014.
- [16] JUTA, a.s. [online]. 2010 [cit. 2016-04-13]. Dostupné z: <http://www.juta.cz/>
- [17] Ceresit: Ceresit CL 69 [online]. [cit. 2016-04-13]. Dostupné z: <http://www.ceresit.cz/produkty/cl69/>.
- [18] KRŇANSKÝ, Jan. *Difúzně otevřené konstrukce dřevostaveb: Diffusion - opened facade walls of wooden buildings*. V Praze: České vysoké učení technické, 2008. ISBN 978-80-01-04201-4.
- [19] PSP.ADV Group s.r.o. [online]. [cit. 2015-05-02]. Dostupné z [http://www.pspadv.cz/obvodovy\\_plast.php](http://www.pspadv.cz/obvodovy_plast.php).
- [20] Zateplovací systémy ETICS. In: *TZB-info* [online]. [cit. 2016-04-23]. ISSN 1801-4399. Dostupné z: <http://stavba.tzb-info.cz/zateplovaci-systemy/303-zateplovaci-systemy-etics>.
- [21] DEK stavebniny [online]. [cit. 2016-04-23]. Dostupné z: <https://www.dek.cz/>.
- [22] PAVLÍK, Zbyšek. *Aplikace "Semi-Scale" experimentů při stanovení tepelně-vlhkostní funkce stavebních materiálů a konstrukcí = Application of semi-scale experiments for determination of hygrothermal function of building materials and structures*. V Praze: České vysoké učení technické, 2013. ISBN 80-010-5406-3.
- [23] KAŇKA, Jan a Zbyněk SVOBODA. *Stavební fyzika 31*. 1. vyd. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2004, 122 s. ISBN 80-010-2861-5.
- [24] ČSN EN ISO 13788. *Tepelně-vlhkostní chování stavebních dílců a stavebních prvků - Vnitřní povrchová teplota pro vyloučení kritické povrchové vlhkosti a kondenzace uvnitř konstrukce - Výpočtové metody*. 2013.
- [25] FRIDRICHOVÁ, Ludmila a kol. *Nanovláknenná vrstva pro stavebnictví: Interní zpráva KHT*. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2014.

- [26] Nanomebrane: Technologie [online]. SVITAP J.H.J. spol. s r.o., 2016 [cit. 2016-01-15]. Dostupné z: <http://www.nanomembrane.cz/cs/technologie>.
- [27] KNÍŽEK, Roman. *Oděvy pro sportovní a outdoorové aktivity*. Vyd. 1. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2013, 39 s. ISBN 978-80-7494-012-5.
- [28] HES, Luboš. *Základy komfortu textilií*. Liberec: Technická univerzita v Liberci
- [29] HDL [online]. [cit. 2016-04-23]. Dostupné z: [http://www.hzdl.com/english/En\\_Honor.asp?Action=content](http://www.hzdl.com/english/En_Honor.asp?Action=content).
- [30] TOMKOVÁ, Blanka. *Textile Reinforced Composites Basic Terms and Definitions: 1st Lecture on Composites* [online]. [cit. 2016-05-08]. Dostupné z: <https://elearning.tul.cz/course/view.php?id=1746>
- [31] FEYNMAN, Richard Phillips, Robert B LEIGHTON a Matthew SANDS. *Feynmanovy přednášky z fyziky s řešenými příklady*. 1. vyd. Havlíčkův Brod: Fragment, 2000. ISBN 80-7200-405-0.
- [32] KVASNICA, Jozef. *Mechanika*. Vyd. 2. Praha: Academia, 2004. ISBN 80-200-1268-0.
- [33] KUBÍKOVÁ, Jana, Petra BERANOVÁ a Tomáš DYNTAR. *Základní kurz statistiky I s programem STATISTICA*. [1. vyd.]. Praha: StatSoft, c2008. ISBN 978-80-903630-3-8
- [34] BRABENEC, Vladimír. *Statistika a biometrika: přednášky a cvičení pro AF a ITS*. Praha: Credit, 2004. ISBN 80-213-1138-X.

## Seznam obrázků

Obrázek 1 Mikroskopické snímky nanovláken [6] .....	14
Obrázek 2 Schematické znázornění atomů v nanovlákně [7] .....	15
Obrázek 3 a) Schéma elektrostatické zvlákňování z trysky; b) Taylorův kužel [6] .....	16
Obrázek 4 Zvlákňování z tyčky [6] .....	17
Obrázek 5 Princip zařízení Nanospider [6] .....	17
Obrázek 6 Nanotextilie před (vlevo) a po filtraci (vpravo) [2] .....	19
Obrázek 7 a) Zkouška propojení složek; b) Možné odstranění nosné textilie [2] .....	20
Obrázek 8 a) Ukázka budovy poničené plísní; b) Nanovl. s nanočásticemi stříbra [7] ..	21
Obrázek 9 a) Měřicí komora v průběhu měření; b) Ochrana dřevěného povrchu [10] ..	23
Obrázek 10 Zkušební vzorek omítky s nanotextilií a jeho snímek z mikroskopu [15] ...	25
Obrázek 11 Aplikace hydroizolačních pásů (17) .....	27
Obrázek 12 Současná konstrukce dřevostaveb [18] .....	28
Obrázek 13 Difúzní otevřenost konstrukcí [18] .....	29
Obrázek 14 Zateplovací systém pro dřevostavby [20, 21] .....	29
Obrázek 15 Montáž systému a) tepelná izolace; b) stěrková hmota; c) omítky [20] ....	30
Obrázek 16 Příklad testovací budovy [22] .....	33
Obrázek 17 Porovnání velikosti pórů se střední dráhou molekuly vodní páry [2] .....	35
Obrázek 18 Nanovláknenná membrána Nanomembrane [26] .....	37
Obrázek 19 Pojistné hydroizolace .....	37
Obrázek 20 Schéma přístroje Permetest [28] .....	38
Obrázek 21 Přístroj FX 3300 pro měření paropropustnosti textilií [29] .....	39
Obrázek 22 Princip měření hydrostatické odolnosti [27] .....	40
Obrázek 23 Schéma metodiky měření .....	42
Obrázek 24 Aplikace testovaného materiálu na HT trubku .....	44
Obrázek 25 Návrh testovacího zařízení .....	44
Obrázek 26 Příprava vzorku na testovací sklenici .....	45
Obrázek 27 a) Založený experiment; b) Detail stojanu; c) Detail trubky se zátkou .....	46
Obrázek 28 Vytvoření úvazu pomocí konopného provázku .....	47
Obrázek 29 Příprava testovací sestavy .....	47
Obrázek 30 Spuštění zkušební sestavy do trubky .....	48
Obrázek 31 Příprava vzorků .....	49
Obrázek 32 Skladba vzorků - Série I. a) včetně membrány; b) bez membrány .....	50
Obrázek 33 Skladba vzorků - Série II. a) včetně membrány; b) bez membrány .....	50
Obrázek 34 Graf vlivu materiálu na relativní paropropustnost (ANOVA) .....	54
Obrázek 35 Graf vlivu materiálu na prodyšnost (ANOVA) .....	57
Obrázek 36 Graf: Propustnost membrány pro vodu v závislosti na čase .....	60
Obrázek 37 Graf: Vliv interakce série a membrány na propustnost .....	63
Obrázek 38 Vliv stavebního materiálu na propustnost membrány .....	65
Obrázek 39 Gravimetrická metoda [28] .....	66
Obrázek 40 Inspirace pro technologický postup výroby .....	67

## Seznam tabulek

Tabulka 1 Naměřená data - paropropustnost .....	53
Tabulka 2 Základní statistiky – relativní paropropustnost p [%].....	53
Tabulka 3 Vliv materiálu na relativní paropropustnost (průměr ± směrodatná chyba)..	55
Tabulka 4 Klasifikace paropropustnosti [27] .....	55
Tabulka 5 Vliv materiálu na výparný odpor (průměr ± směrodatná chyba). ....	55
Tabulka 6 Naměřená data - prodyšnost.....	56
Tabulka 7 Základní statistiky - prodyšnost.....	56
Tabulka 8 Vliv materiálu na prodyšnost (průměr ± směrodatná chyba).....	58
Tabulka 9 Hydrostatická odolnost.....	58
Tabulka 10 Naměřená data při měření propustnosti membrány pro vodu.....	59
Tabulka 11 Hmotnostní přírůstky sestavy při měření propustnosti membrány .....	59
Tabulka 12 Vypočtená propustnost membrány vodu .....	60
Tabulka 13 Naměřené hmotnosti sorbentu pro vzorky ze Série I. včetně membrány ...	61
Tabulka 14 Naměřené hmotnosti sorbentu pro vzorky ze Série I. bez membrány .....	62
Tabulka 15 Naměřené hmotnosti sorbentu pro vzorky ze Série II. včetně membrány ..	62
Tabulka 16 Naměřené hmotnosti sorbentu pro vzorky ze Série II. bez membrány .....	62
Tabulka 17 Základní statistiky – propustnost [kg.m <sup>-2</sup> ] .....	63
Tabulka 18 Vliv interakce série a membrány na propustnost (průměr ± směr. ch.).....	64
Tabulka 19 Vliv materiálu na propustnost (průměr ± směrodatná chyba) .....	64